

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 11-150983  
(43)Date of publication of application : 02.06.1999

(51)Int.Cl.

H02P 6/18

(21)Application number : 09-337966  
(22)Date of filing : 20.11.1997

(71)Applicant : TOYOTA MOTOR CORP  
(72)Inventor : YAMADA EIJI  
KAWABATA YASUMI

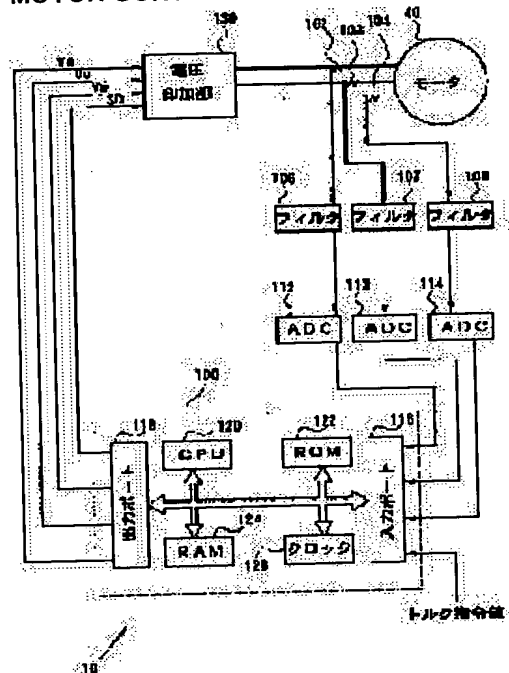
(30)Priority

Priority number : 09268096 Priority date : 12.09.1997 Priority country : JP

## (54) ELECTRIC ANGLE DETECTOR AND DETECTING METHOD, AND MOTOR CONTROLLER

(57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To control a motor appropriately by operating the electric angle of a motor based on the behavior of current detected by a current detecting means thereby detecting the electric angle accurately even when a high torque output is required.  
**SOLUTION:** A motor controller 10 comprises a CPU 120 which detects current initial values  $I_{\gamma;0}$ ,  $I_{\delta;0}$  in the directions of  $\gamma$ -axis and  $\delta$ -axis when a torque command value is larger than a specified torque value and applies a  $-\Delta V_{\delta}$  voltage to the  $\delta$ -axis and then detects current values  $I_{\gamma;1}$ ,  $I_{\delta;1}$  upon elapsing a sampling time. Subsequently, a  $\Delta V_{\delta}$  voltage is applied in the  $\delta$ -axis direction and current values  $I_{\gamma;2}$ ,  $I_{\delta;2}$  are detected upon elapsing a sampling time. Current variations  $\Delta I_{\gamma}$ ,  $\Delta I_{\delta}$  are then calculated using the detected current values in order to determine a section where an error angle  $\Delta\theta$  exists. The error angle  $\Delta\theta$  is calculated based on the section and an estimated electric angle is corrected. According to the method, the electric angle can be detected accurately even when a high torque is commanded and the motor can be controlled appropriately.



### LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 13.10.1998  
[Date of sending the examiner's decision of rejection]  
[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]  
[Date of final disposal for application]  
[Patent number] 3168967  
[Date of registration] 16.03.2001  
[Number of appeal against examiner's decision of rejection]  
[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]  
[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2000 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-150983

(43) 公開日 平成11年(1999) 6月2日

(51) Int.Cl.<sup>6</sup>

H 0 2 P 6/18

識別記号

F I

H 0 2 P 6/02

3 7 1 S

審査請求 有 請求項の数10 F D (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願平9-337966

(22) 出願日 平成9年(1997)11月20日

(31) 優先権主張番号 特願平9-268096

(32) 優先日 平9(1997)9月12日

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000003207

トヨタ自動車株式会社

愛知県豊田市トヨタ町1番地

(72) 発明者 山田 英治

愛知県豊田市トヨタ町1番地 トヨタ自動車株式会社内

(72) 発明者 川端 康己

愛知県豊田市トヨタ町1番地 トヨタ自動車株式会社内

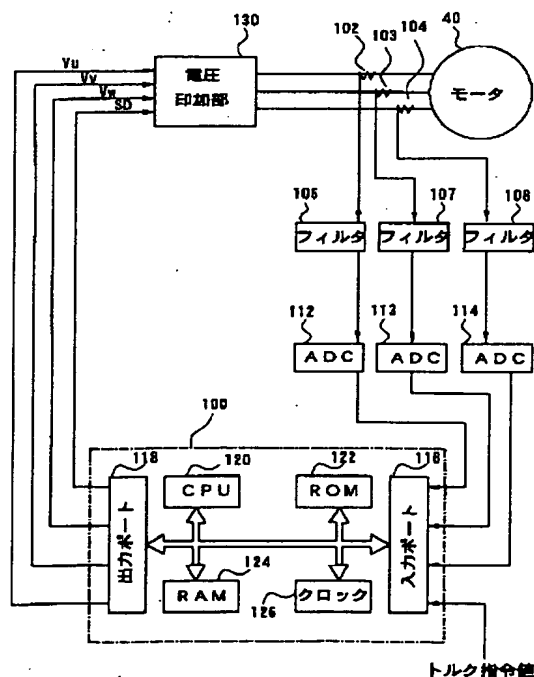
(74) 代理人 弁理士 下出 隆史 (外2名)

(54) 【発明の名称】 電気角検出装置および方法、並びにモータ制御装置

(57) 【要約】

【課題】 低速運転時にトルク要求値が高くなると、同期モータについてセンサレスで電気角を検出し、制御することができなかった。

【解決手段】 モータの回転軸を通り磁束が永久磁石を貫く方向をd軸、モータの回転面内でd軸に電氣的に直交する方向をq軸と定義する。モータの低速運転時において高トルクが要求された場合には、q軸に負の電圧を印加し、該電圧に応じてd軸、q軸に流れる電流の比に基づいて電気角を検出する。かかる手段を採ることにより高トルク時にq軸に生じる磁気飽和を緩和し、電気角を検出することが可能となる。他の手段として、高トルク時にq軸に正電圧を印加した場合、q軸に流れる電流と電気角との間には1対1の対応関係があることに鑑み、かかる関係をテーブルとして予め記憶しておく。q軸電流に基づいてこのテーブルを参照することにより電気角を検出することが可能となる。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 多相交流を巻線に流した際に該巻線に生じる磁界と永久磁石による磁界との相互作用により回転子を回転させる同期モータについて、前記回転子の回転中心を通り前記永久磁石による磁界に沿う方向である d 軸方向、および前記回転子の回転面内において前記 d 軸方向に電氣的に直交する方向である q 軸方向を定義する電気角を検出する電気角検出装置であって、前記モータが出力すべきトルクであるトルク指令値に応じて前記 q 軸方向に印加される電圧に対し、所定期間、所定の負の電圧を重畳して印加する制御を行う印加電圧制御手段と、前記 d 軸方向に磁界を生じる d 軸電流、および前記 q 軸方向に磁界を生じる q 軸電流のそれぞれについて、前記重畳された電圧に応じて生じる挙動を検出する電流検出手段と、該検出された電流の挙動に基づいて、前記モータの電気角を演算する電気角演算手段とを備える電気角検出装置。

【請求項 2】 請求項 1 の電気角検出装置であって、前記印加電圧制御手段は、前記制御を前記トルク指令値が所定値以上である場合に行う手段である電気角検出装置。

【請求項 3】 請求項 1 の電気角検出装置であって、前記印加電圧制御手段は、前記重畳して印加する電圧の絶対値および電圧印加時間の少なくとも一方を、前記トルク指令値の減少とともに単調減少の関係にある所定の値とする手段である電気角検出装置。

【請求項 4】 請求項 1 の電気角検出装置であって、前記印加電圧制御手段は、前記 q 軸方向に第 1 の所定期間、所定の負の電圧を重畳して印加した後、該 q 軸方向に第 2 の所定時間、所定の正の電圧を重畳して印加する手段である電気角検出装置。

【請求項 5】 多相交流を巻線に流した際に該巻線に生じる磁界と永久磁石による磁界との相互作用により回転子を回転させる同期モータについて、前記回転子の回転中心を通り前記永久磁石による磁界に沿う方向である d 軸方向、および前記回転子の回転面内において前記 d 軸方向に電氣的に直交する方向である q 軸方向を定義する電気角を、想定した電気角と真の電気角との誤差を介して検出する電気角検出装置であって、前記モータが出力すべきトルクであるトルク指令値が所定値以上である場合に、該トルク指令値に応じて前記 q 軸方向に印加される電圧に対し、所定期間、所定の検出用電圧を重畳して印加する制御を行う印加電圧制御手段と、前記 q 軸方向に磁界を生じる q 軸電流について、前記検出用電圧に応じて生じる挙動と前記誤差との関係を、前

記トルク指令値に応じて予め記憶する記憶手段と、前記 q 軸電流について、前記検出用電圧に応じて生じる挙動を検出する電流検出手段と、該検出された電流の挙動に基づいて、前記記憶手段に記憶された関係を参照して前記誤差を求めることにより、前記モータの電気角を演算する電気角演算手段とを備える電気角検出装置。

【請求項 6】 請求項 5 記載の電気角検出装置であって、前記検出用電圧は正の電圧である電気角検出装置。

【請求項 7】 多相交流を巻線に流すことにより該巻線に生じる磁界と永久磁石による磁界との相互作用により回転子を回転させる同期モータについて、前記回転子の回転中心を通り前記永久磁石による磁界に沿う方向である d 軸方向、および前記回転子の回転面内において前記 d 軸方向に電氣的に直交する方向である q 軸方向を定義する電気角を検出する電気角検出方法であって、前記モータが出力すべきトルクであるトルク指令値に応じて前記 q 軸方向に印加される電圧に対し、所定期間、所定の負の電圧を重畳して印加する制御を行い、前記 d 軸方向に磁界を生じる d 軸電流、および前記 q 軸方向に磁界を生じる q 軸電流のそれぞれについて、前記重畳された電圧に応じて生じる挙動を検出し、該検出された電流の挙動に基づいて、前記モータの電気角を演算する電気角検出方法。

【請求項 8】 多相交流を巻線に流した際に該巻線に生じる磁界と永久磁石による磁界との相互作用により回転子を回転させる同期モータについて、前記回転子の回転中心を通り前記永久磁石による磁界に沿う方向である d 軸方向、および前記回転子の回転面内において前記 d 軸方向に電氣的に直交する方向である q 軸方向を定義する電気角を、仮に想定した電気角と真の電気角との誤差を介して検出する電気角検出方法であって、前記モータが出力すべきトルクであるトルク指令値が所定値以上である場合に該トルク指令値に応じて前記 q 軸方向に印加される電圧に対し、所定期間、所定の検出用電圧を重畳して印加する制御を行い、前記 q 軸方向に磁界を生じる q 軸電流について、前記検出用電圧に応じて生じる挙動を検出し、前記検出用電圧に応じて前記 q 軸電流に生じる挙動と前記誤差との予め記憶された関係を参照することにより、該検出された電流の挙動に応じた前記誤差を求めて、前記モータの電気角を演算する電気角検出方法。

【請求項 9】 多相交流を巻線に流した際に該巻線に生じる磁界と永久磁石による磁界との相互作用により回転子を回転させる同期モータを、前記回転子の回転中心を通り前記永久磁石による磁界に沿う方向である d 軸方向、および前記回転子の回転面内において前記 d 軸方向

に電氣的に直交する方向である  $q$  軸方向を定義する電気角に基づいて制御するモータ制御装置であって、前記モータが出力すべきトルクであるトルク指令値を読み込むトルク指令値読み込み手段と、電気角を想定し、該想定された電気角に基づいて定義される  $d$  軸方向および  $q$  軸方向にトルク指令値に応じた電圧を印加する電圧印加手段と、前記電圧印加手段により前記  $q$  軸方向に印加される電圧に対し、所定期間、所定の負の電圧を重畳して印加する制御を行う印加電圧制御手段と、前記  $d$  軸方向に磁界を生じる  $d$  軸電流、および前記  $q$  軸方向に磁界を生じる  $q$  軸電流のそれぞれについて、前記重畳された電圧に応じて生じる挙動を検出する電流検出手段と、該検出された電流の挙動に基づいて、前記モータの電気角を演算する電気角演算手段と、前記想定された電気角を該演算された電気角に更新する電気角更新手段とを備えるモータ制御装置。

【請求項 10】 多相交流を巻線に流した際に該巻線に生じる磁界と永久磁石による磁界との相互作用により回転子を回転させる同期モータを、前記回転子の回転中心を通り前記永久磁石による磁界に沿う方向である  $d$  軸方向、および前記回転子の回転面内において前記  $d$  軸方向に電氣的に直交する方向である  $q$  軸方向を定義する電気角を、仮に想定した電気角と真の電気角との誤差を介して検出し、前記電流を流すために巻線に印加する電圧を該電気角に基づいて制御するモータ制御装置であって、前記モータが出力すべきトルクであるトルク指令値を読み込むトルク指令値読み込み手段と、電気角を想定し、該想定された電気角に基づいて定義される  $d$  軸方向および  $q$  軸方向に前記トルク指令値に応じた電圧を印加する電圧印加手段と、前記トルク指令値に応じて前記  $q$  軸方向に印加される電圧に対し、所定期間、所定の検出用電圧を重畳して印加する制御を行う印加電圧制御手段と、前記  $q$  軸方向に磁界を生じる  $q$  軸電流について、前記検出用電圧に応じて生じる挙動と前記誤差との関係を、前記トルク指令値に応じて予め記憶する記憶手段と、前記  $q$  軸電流について、前記検出用電圧に応じて生じる挙動を検出する電流検出手段と、該検出された電流の挙動に基づいて、前記記憶手段に記憶された関係を参照して前記誤差を求めることにより、前記モータの電気角を演算する電気角演算手段と、前記想定された電気角を該演算された電気角に更新する電気角更新手段とを備えるモータ制御装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、センサレスで同期モータの電気角を検出する技術および同期モータを制御

する技術に関し、詳しくは同期モータの運転状態が静止中および低回転である場合におけるこれらの技術に関する。

【0002】

【従来の技術】 多相交流を巻線に流し、該巻線による磁界と永久磁石による磁界との相互作用により回転子を回転させる同期モータで、所望の回転トルクを得るためには、回転子の位置、即ち電気角に応じて巻線に流す多相交流を制御する必要がある。この際、ホール素子等のセンサを用いて電気角を検出する方法もあるが、同期モータの制御装置の信頼性を確保する観点から、上述したセンサを用いない、いわゆるセンサレスで電気角を検出することが望まれている。

【0003】 例えば、同期モータが静止時または低回転で運転している場合において、センサレスで電気角を検出する方法としては、次の方法が知られている。これは、いわゆる突極型の永久磁石型モータについて、回転子角度に応じて磁気回路中の磁気抵抗が変化し、巻線のインダクタンスが変化することを利用したものである。

【0004】 永久磁石型の三相同期モータを例にとりて説明する。この同期モータは図 4 に示す通り、 $U$ 、 $V$ 、 $W$  の三相コイルと、回転軸中心回りに回転する永久磁石を有する等価回路により表される。この等価回路において永久磁石の  $N$  極側を正方向として貫く軸を  $d$  軸と定義し、それに直交する軸を  $q$  軸と定義する。このように定義するとモータのトルクを主に支配するのは  $q$  軸方向の磁界となる。また、電気角は  $U$  相コイルを貫く軸と  $d$  軸との回転角  $\theta$  となる。なお、 $d$  軸方向に磁界を生じるように電圧を印加した場合の巻線のインダクタンスを  $L_d$  とし、同じく  $q$  軸方向についてのインダクタンスを  $L_q$  とする。一方、この同期モータを制御する制御装置は、最初は回転子の位置を正確に検出できていないため、図 4 に示す通り、電気角が  $\theta_c$  であると想定しており、現実の電気角  $\theta$  とは誤差  $\Delta\theta$  を生じている。図 4 では、制御装置が想定している軸を、前記  $d$  軸、 $q$  軸に対し、 $\gamma$  軸、 $\delta$  軸として示している。

【0005】 この状態で、電気角を検出するためにモータ制御装置は、 $\gamma$  軸方向に電圧を印加し、その結果、 $\gamma$  方向および  $\delta$  方向に流れる電流を検出する。仮にモータ制御装置が想定している  $\gamma$  軸が  $d$  軸と一致している場合には、 $\delta$  方向の電流は検出されないはずである。しかし、電気角に誤差  $\Delta\theta$  を生じている場合には、 $\delta$  軸方向の電流が検出される。また、 $\Delta\theta$  の大きさに応じて  $\gamma$  軸方向の電流および  $\delta$  軸方向の電流が変化する。従って、これらの検出電流に基づいて誤差  $\Delta\theta$  を演算することができ、ひいては電気角  $\theta$  を検出することができる。なお、誤差  $\Delta\theta$  を求めるための演算方法については、後で詳述する。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】 上記方法は、同期モータ

タが静止時または低回転で運転している場合において電気角を比較的精度良く検出することができる優れたものである。しかし、かかる運転状態にある同期モータであっても、モータが出力すべきトルクをモータの定格に応じて定まる所定のトルク以上に大きくしていくと、上述の方法では電気角を検出できないことが確認された。モータをセンサレスで制御する技術は、比較的近年になって研究が開始された技術であり、かかる課題について報告された例は今まで存在しなかった。

【0007】これに対し、出力すべきトルクに対し、十分に余裕のある定格でモータを設計することも可能ではあるが、これはモータの大型化および重量の増大という問題を招いてしまう。

【0008】本発明は上記課題を解決するためになされ、同期モータが静止時または低回転で運転している際に、高トルクを出力することが要求された場合にも、その電気角を精度良く検出し、モータを適切に制御する技術を提供することを目的とする。

【0009】

【課題を解決するための手段およびその作用・効果】上記課題を解決するために、本発明では以下の構成を採った。本発明の第1の電気角検出装置は、多相交流を巻線に流した際に該巻線に生じる磁界と永久磁石による磁界との相互作用により回転子を回転させる同期モータについて、前記回転子の回転中心を通り前記永久磁石による磁界に沿う方向であるd軸方向、および前記回転子の回転面内において前記d軸方向に電気的に直交する方向であるq軸方向を定義する電気角を検出する電気角検出装置であって、前記モータが出力すべきトルクであるトルク指令値に応じて前記q軸方向に印加される電圧に対し、所定期間、所定の負の電圧を重畳して印加する制御を行う印加電圧制御手段と、前記d軸方向に磁界を生じるd軸電流、および前記q軸方向に磁界を生じるq軸電流のそれぞれについて、前記重畳された電圧に応じて生じる挙動を検出する電流検出手段と、該検出された電流の挙動に基づいて、前記モータの電気角を演算する電気角演算手段とを備えることを要旨とする。

【0010】本発明の第1の電気角検出方法は、多相交流を巻線に流すことにより該巻線に生じる磁界と永久磁石による磁界との相互作用により回転子を回転させる同期モータについて、前記回転子の回転中心を通り前記永久磁石による磁界に沿う方向であるd軸方向、および前記回転子の回転面内において前記d軸方向に電気的に直交する方向であるq軸方向を定義する電気角を検出する電気角検出方法であって、前記モータが出力すべきトルクであるトルク指令値に応じて前記q軸方向に印加される電圧に対し、所定期間、所定の負の電圧を重畳して印

加する制御を行い、前記d軸方向に磁界を生じるd軸電流、および前記q軸方向に磁界を生じるq軸電流のそれぞれについて、前記重畳された電圧に応じて生じる挙動を検出し、該検出された電流の挙動に基づいて、前記モータの電気角を演算することを要旨とする。

【0011】従来の電気角検出方法においては、モータが出力すべきトルクであるトルク指令値に応じてd軸方向において印加される電圧に対し、所定期間、所定の正の電圧を重畳して印加していたのに対し、上述の電気角検出装置および電気角検出方法においては、q軸方向に所定の負の電圧を重畳して印加する点で相違する。この結果、上述の電気角検出装置および電気角検出方法によれば、同期モータが静止時または低回転（以下、両者を含めて低速運転時と呼ぶ）において、高トルクを出力すべき要求がなされた場合であっても電気角を精度良く検出することができる。

【0012】なお、本明細書において重畳するとは、一般に用いられる搬送波に信号波を重ね合わせるという意味よりも広い意味に用いており、第1の電圧値に第2の電圧値を加えた電圧を印加するという意味で用いている。従って、q軸方向に所定の負の電圧を重畳して印加するとは、q軸方向に所定の値だけ減じた電圧を印加するというのと同義である。

【0013】上記発明がなされるためには、当然、従来の電気角検出方法によっては高トルクが要求された時に電気角を検出できなかった原因について解明することが必要である。従来の電気角検出方法について、高トルクが要求された時に電気角を検出できないという事象およびその原因について報告された例は存在しなかった。そこで、本願発明者は、種々の実験および解析に基づいて、上記原因が以下に示す点にあることを明らかにした。

【0014】先に説明した通り、従来の方法により電気角を検出する場合には、電気角検出装置は、トルク指令値に応じて印加すべき電圧に対し、図4のγ軸方向に電気角検出用の電圧 $\Delta V_\gamma$ を重畳して印加する。図4に示したγ軸からd軸に回転する方向、即ち回転子の回転する方向を正として電気角誤差が生じていると仮定すれば、上記 $\Delta V_\gamma$ に応じてd軸およびq軸に印加される電圧 $\Delta V_d$ 、 $\Delta V_q$ は、それぞれ次式(1)で表される。

$$\begin{aligned}\Delta V_d &= \Delta V_\gamma \cdot \cos \Delta \theta \\ \Delta V_q &= -\Delta V_\gamma \cdot \sin \Delta \theta \quad \dots (1)\end{aligned}$$

【0015】従って、これらの電圧 $V_d$ 、 $V_q$ に応じてd軸、q軸方向に流れる電流 $\Delta I_d$ 、 $\Delta I_q$ は、d軸方向およびq軸方向のインダクタンスを $L_d$ 、 $L_q$ とし、電圧印加後の経過時間を $t$ とすれば、それぞれ次式(2)で表される。

$$\begin{aligned}\Delta I_d &= \Delta V_\gamma \cdot t \cdot \cos \Delta \theta / L_d \\ \Delta I_q &= -\Delta V_\gamma \cdot t \cdot \sin \Delta \theta / L_q \quad \dots (2)\end{aligned}$$

【0016】次に、上記 $\Delta I_d$ 、 $\Delta I_q$ を電気角検出装

置が想定しているγ軸、δ軸方向の電流値 $\Delta I_\gamma$ 、 $\Delta I_\delta$

$\delta$ に変換すると、それぞれ次式(3)および(4)で表される。参考として $\gamma$ 軸方向に電圧 $\Delta V\gamma$ が印加された

$$\begin{aligned}\Delta I\gamma &= \Delta Id \cdot \cos \Delta\theta - \Delta Iq \cdot \sin \Delta\theta \\ &= \Delta V\gamma \cdot t (A + \Delta I \cdot \cos 2\Delta\theta) \quad \dots (3)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta I\delta &= \Delta Id \cdot \sin \Delta\theta - \Delta Iq \cdot \cos \Delta\theta \\ &= \Delta V\gamma \cdot t \cdot \Delta I \cdot \sin 2\Delta\theta \quad \dots (4)\end{aligned}$$

但し、

$$A = (1/Ld + 1/Lq) / 2$$

$$\Delta I = (1/Ld - 1/Lq) / 2$$

である。なお、図3および図4で示す、いわゆる突極型のモータでは、インダクタンスには $Ld < Lq$ なる関係があり、 $\Delta I > 0$ となる。

【0017】上式(3)、(4)より、 $\gamma$ 軸、 $\delta$ 軸方向の電流値 $\Delta I\gamma$ 、 $\Delta I\delta$ は、電気角の誤差角 $\Delta\theta$ に応じて周期的に変化することが分かる。この様子を図8に示す。なお、図8では、 $\Delta I\gamma A = \Delta I\gamma - \Delta V\gamma \cdot t \cdot A$ により、 $\Delta I\gamma$ をシフトした値を示している。 $\Delta\theta$ が

$$\Delta I\gamma = \Delta V\gamma \cdot t (A + \Delta I \cdot \cos 2(\Delta\theta - \pi/4)) \quad \dots (5)$$

$$\Delta I\delta = \Delta V\gamma \cdot t \cdot \Delta I \cdot \sin 2(\Delta\theta - \pi/4) \quad \dots (6)$$

つまり、式(5)、(6)を用いて $\Delta\theta - \pi/4$ を求め、該演算結果に $\pi/4$ を加えることにより $\Delta\theta$ を求めるのである。なお、正の誤差角 $\Delta\theta$ (図4における $\gamma$ 軸から $d$ 軸に回転する方向の誤差角)が生じている場合を例にとって説明したが、逆方向の誤差角が生じている場合、即ち誤差角 $\Delta\theta$ が負となる場合についても同様に $\Delta\theta$ を求めることができる。

【0018】以上の方法では、インダクタンスに $Ld < Lq$ なる関係があり、 $\Delta I > 0$ であることが前提となっている。仮に $Ld = Lq$ であれば、 $\Delta I = 0$ となるため、上式(3)、(4)から分かる通り、 $\Delta I\gamma A$ および $\Delta I\delta$ は $\Delta\theta$ の値に依らず一定値をとることになり、 $\Delta\theta$ を算出することができない。また、 $Ld > Lq$ となり $\Delta I < 0$ となった場合には、図8において $\Delta I\gamma A$ および $\Delta I\delta$ の値がそれぞれ正負逆転することになるため、 $\Delta I\gamma A + \Delta I\delta$ 、 $\Delta I\gamma A - \Delta I\delta$ の正負に基づく区間の判断が誤ったものとなってしまう。つまり、 $\Delta I > 0$ の場合と同じ判断方法により区間を判断すれば、 $\Delta\theta$ が90度異なった範囲の区間に属しているものと判断されてしまう。従って、演算された電気角も90度異なった値となってしまう。

【0019】モータに要求されるトルクが低い場合には、インダクタンスについて $Ld < Lq$ なる関係が保たれているため、かかる状態は生じ得なかった。しかし、高トルクが要求される場合には、インダクタンスについて $Ld \geq Lq$ なる状態が生じ得る。この点について図12を用いて説明する。図12は、モータの固定子について、外部から与えられる磁界 $H$ と磁束密度 $B$ との関係を表したものである。外部から与えられる磁界 $H$ には、モータの永久磁石による磁界と巻線に流れる電流による磁界とがあり、 $d$ 軸、 $q$ 軸方向に分けて考える限り前者は

場合における $\gamma$ 軸、 $\delta$ 軸方向の電流変化の様子を図7に示す。

比較的小さい場合には、 $\Delta\theta = \tan(2\Delta\theta)/2$ なる近似式が成立するため、該関係を用いれば上式

(3)、(4)より $\Delta\theta$ を求めることができる。但し、 $\Delta\theta$ が小さい範囲で演算する必要があることから、 $\Delta\theta$ を図8に示す16の区部に分割し、 $\Delta I\gamma A + \Delta I\delta$ 、 $\Delta I\gamma A - \Delta I\delta$ の正負に応じて $\Delta\theta$ がいずれの区分に属しているかを判断した上で、該区分に応じて $\Delta\theta$ の基準をずらして演算する。例えば、 $\Delta\theta$ が図8の区分10に属していると判断される場合には、上式(3)、(4)の $\Delta\theta$ を $\Delta\theta - \pi/4$ と置換した次式(5)、(6)を用いる。

一定の値をとるため、図12は巻線に流れる電流による磁束密度への影響を表しているとも考えることもできる。なお、図12において $d$ 軸に対応する曲線 $Cd$ 、および $q$ 軸に対応する曲線 $Cq$ の各点における接線の傾きがインダクタンス $Ld$ 、 $Lq$ に相当する。

【0020】磁束密度は、図12の曲線 $Cq$ に示す通り、外部からの磁界 $H$ が比較的小さい領域では、線形性を維持しているが(領域A)、ある値以上になると、いわゆる磁束飽和現象を生じ非線形となる(領域B)。モータに要求されるトルクが低いときは領域Aの状態にあり、図12の点 $a1$ 、 $a2$ に示すように $d$ 軸、 $q$ 軸のインダクタンスが相違しているため、電気角を検出することができる。一方、モータに要求されるトルクが大きくなると、モータ巻線に流す電流が増大するため、外部から与えられる磁界 $H$ は増大し、やがて非線形領域(領域B)に入る。図12の点 $b$ は、接線の傾きが曲線 $Cd$ と平行になる点である。つまり、この時、インダクタンスは $Lq = Ld$ となる。また、点 $b$ を越えてさらに要求されるトルクが大きくなると(点 $c$ )、図12から分かる通り、両インダクタンスの関係は逆転し、 $Lq < Ld$ となる。

【0021】従来の電気角検出方法は、トルク要求値に対し定格値に十分余裕のあるモータが使用されることを前提として提案されていた。従って、モータの磁束密度は先に説明した線形領域(図12の領域A)にあることが前提であり、インダクタンスは一定値をとるものとされていた。本願発明者は、モータの小型化を図った結果、高トルク時に電気角が検出できなくなったことを契機として、種々の実験および解析を行った。高トルク時に電気角が検出できなくなる事象に対して数多くの要因が想定される中、本願発明者のかかる努力により、上記

の説明の通り、本質的原因は高トルク時にはモータ固定子に磁束飽和現象が生じ、d軸方向およびq軸方向のインダクタンスの大小関係が、低トルク時と逆転してしまう点にあることが明らかとなった。

【0022】かかる原因を踏まえ、本発明では電気角検出時にd軸方向ではなく、q軸方向に、しかも所定の負の電圧を重畳して印加する。つまり、q軸に加えられる外部磁界を減少する方向に電圧を印加するのである。この結果、図12に示す領域Aにおいて電流を検出できるようになり、インダクタンスについて $L_d < L_q$ なる関

$$\Delta I_\gamma = \Delta V_\delta \cdot t \cdot \Delta I \cdot \sin 2\Delta\theta \quad \cdots (7)$$

$$\Delta I_\delta = \Delta V_\delta \cdot t \cdot \Delta I \cdot (A - \cos 2\Delta\theta) \quad \cdots (8)$$

但し、

$$A = (1/L_d + 1/L_q) / 2$$

$$\Delta I = (1/L_d - 1/L_q) / 2$$

である。従って、電流 $\Delta I_\gamma$ 、 $\Delta I_\delta$ が検出されれば、電気角の誤差角 $\Delta\theta$ を算出することができる。

【0024】以上で説明した電気角検出装置における電気角演算手段には、d軸電流の挙動とq軸電流の挙動とに基づいて、想定された電気角と真の電気角との補正量を求めることにより、モータの電気角を演算する種々の手段が含まれる。上述した方法により電気角を求める手段はその一例である。

【0025】前記電気角検出装置において、前記印加電圧制御手段は、前記制御を前記トルク指令値が所定値以上である場合に行う手段とすることが望ましい。

【0026】先に説明した電気角検出装置では、モータのトルクを主に支配するq軸方向に負の電圧を印加するため、電気角検出時にトルクの減少をいくらか生じる可能性もある。これに対し、上述の電気角検出装置によれば、モータのトルク指令値が所定値以上である場合にのみq軸方向に電圧を印加するため、電気角検出中におけるトルク変動を最小限に抑えることができる。ここにいうトルクの所定値はd軸に電圧を印加する等の他の方法により電気角が検出できなくなるトルク指令値に基づいて実験的に定めればよい。なお、該所定値以下のトルク指令値においては、従来技術として説明した方法により電気角を検出するものとしてもよいし、他の方法により検出するものとしてもよい。他の方法としては、例えば本出願人が提案している特開平7-177788記載の方法等が挙げられる。

【0027】また、前記電圧印加制御手段は、前記重畳して印加する電圧の絶対値および電圧印加時間の少なくとも一方を、前記トルク指令値の減少とともに単調減少の関係にある所定の値とする手段とすることが望ましい。

【0028】高トルク時において電気角を検出可能にするためには、q軸方向のインダクタンス $L_q$ が線形領域(図12の領域A)にあればよい。図12から明らかな通り、q軸方向のインダクタンス $L_q$ がかか

る係が維持されるため、高トルク時においても電気角を検出することができる。重畳すべき負の電圧値は磁束飽和が十分緩和される値をモータ固定子の磁束飽和特性に応じて実験的あるいは解析的に求めればよい。

【0023】q軸に電圧を印加した場合の電気角の誤差角 $\Delta\theta$ の算出についての詳細は後述するが、その概要は次の通りである。q軸に印加する所定の負の電圧の絶対値を $\Delta V_\delta$ とすれば、d軸に電圧を印加した場合について先に説明した式(3)(4)に相当する式として、次式(7)、(8)が求められる。

るために重畳すべき電圧の絶対値はモータに要求されるトルクに応じて変化し、例えば、点cに相当するトルクが要求されている場合には大きく、点bに相当するトルクが要求されている場合には小さくなる。電圧印加時間についても同様のことがいえる。上述の電気角検出装置によれば、モータに要求されるトルク指令値が小さくなるにつれて、前記重畳して印加する電圧の絶対値および電圧印加時間の少なくとも一方を小さくすることができるため、q軸への電圧印加によるトルク変動を必要最小限に抑えることができる。なお、上でいう単調減少は、印加する電圧の絶対値が、トルク指令値の減少に応じて直線的に減少するもののみならず、曲線的に減少するものや段階的に減少するものであってもよい。また、印加する電圧の絶対値および電圧印加時間の一方のみを減少するものとしてもよいし、双方を減少するものとしてもよい。

【0029】一方、前記電気角検出装置において、前記印加電圧制御手段は、前記電圧印加手段を制御して、前記q軸方向に第1の所定期間、所定の負の電圧を重畳して印加した後、該q軸方向に第2の所定時間、所定の正の電圧を重畳して印加する手段とすることも望ましい。

【0030】かかる電気角検出装置は、q軸に負の電圧を重畳して印加した後、正の電圧を重畳して印加する。この結果、負の電圧を重畳して印加した結果、減少したq軸方向の電流を、要求トルクに応じた所定の電流値まで早期に回復することができ、電気角検出中におけるトルク変動の影響を抑えることができる。q軸方向に重畳する電圧の絶対値および上記第2の所定期間は、かかる効果を考慮して求めればよく、電気角検出のために重畳される負の電圧の絶対値および第1の所定期間と必ずしも一致させる必要はない。

【0031】本発明の第2の電気角検出装置は、多相交流を巻線に流した際に該巻線に生じる磁界と永久磁石による磁界との相互作用により回転子を回転させる同期モータについて、前記回転子の回転中心を通り前記永久磁石による磁界に沿う方向であるd軸方向、および前記回転子の回転面内において前記d軸方向に電氣的に直交する方向であるq軸方向を定義する電気角を、仮に想定し

た電気角と真の電気角との誤差を介して検出する電気角検出装置であって、前記モータが出力すべきトルクであるトルク指令値が所定値以上である場合に、該トルク指令値に応じて前記q軸方向に印加される電圧に対し、所定期間、所定の検出用電圧を重畳して印加する制御を行う印加電圧制御手段と、前記q軸方向に磁界を生じるq軸電流について、前記検出用電圧に応じて生じる挙動と前記誤差との関係を、前記トルク指令値に応じて予め記憶する記憶手段と、前記q軸電流について、前記検出用電圧に応じて生じる挙動を検出する電流検出手段と、該検出された電流の挙動に基づいて、前記記憶手段に記憶された関係を参照して前記誤差を求めることにより、前記モータの電気角を演算する電気角演算手段とを備えることを要旨とする。

【0032】本発明の第2の電気角検出方法は、多相交流を巻線に流した際に該巻線に生じる磁界と永久磁石による磁界との相互作用により回転子を回転させる同期モータについて、前記回転子の回転中心を通り前記永久磁石による磁界に沿う方向であるd軸方向、および前記回転子の回転面内において前記d軸方向に電氣的に直交する方向であるq軸方向を定義する電気角を、仮に想定した電気角と真の電気角との誤差を介して検出する電気角検出方法であって、前記モータが出力すべきトルクであるトルク指令値が所定値以上である場合に該トルク指令値に応じて前記q軸方向に印加される電圧に対し、所定期間、所定の検出用電圧を重畳して印加する制御を行い、前記q軸方向に磁界を生じるq軸電流について、前記検出用電圧に応じて生じる挙動を検出し、前記検出用電圧に応じて前記q軸電流に生じる挙動と前記誤差との予め記憶された関係を参照することにより、該検出された電流の挙動に応じた前記誤差を求めて、前記モータの電気角を演算することを要旨とする。

【0033】かかる電気角検出装置および電気角検出方法によれば、同期モータが低回転で運転している場合において、高トルクを出力すべき要求がなされた場合であっても電気角を精度良く検出することができる。かかる運転状況において電気角が検出されなくなる原因が磁束飽和現象にあることは既に説明した。本願発明者はかかる原因を解明するだけでなく、磁束飽和現象が生じている場合において印加された電圧に応じて流れるq軸電流の挙動を調査した。この結果、磁束飽和現象が起きている場合にはq軸電流と電気角の誤差との間には、図18

$$\phi 2 = \sqrt{(d1^2 + q1^2 + 2d1 \cdot q1 \cdot \sin \Delta \theta)}$$

【0037】上式(9)(10)を比較すると、誤差角 $\Delta \theta$ が正の値である場合にはその誤差角に応じて、式

(10)で表されるベクトル $\phi 2$ の方が、ベクトル $\phi 1$ よりも大きくなることが分かる。これは、磁気飽和を生じる程の磁界が生じている状態(図12の領域B)において、更に誤差角に応じて磁束密度が高くなることを意

に一例を示すようにトルク指令値に応じてq軸方向に流れている電流に対して一義的な関係が存在することが実験的に見いだされた。図18は横軸に電気角の誤差、縦軸にq軸電流を取り、両者の関係をトルク指令値に応じてq軸に流れる電流値 $i1, i2, \dots$ ごとに示した図である。 $i1, i2, \dots$ の順にトルク指令値が大きくなることを意味している。

【0034】上記第2の電気角検出装置および電気角検出方法は、かかる知見に基づいてなされたものである。上記電気角検出装置および電気角検出方法によれば、例えば図18に示したようなq軸電流と電気角の誤差との関係を予めトルク指令値に応じて記憶する記憶手段を備える。従って、q軸方向に重畳した電圧に応じて流れるq軸電流に基づいて、この記憶手段に記憶されている関係を参照することにより、該誤差を介して電気角を検出することができる。なお、図18に示した関係は、テーブル形式で記憶するものとしてもよいし、近似関数の形で記憶するものとしてもよい。

【0035】上述したように、磁束飽和現象が起きている場合にはq軸電流と電気角の誤差との間に一義的な関係が存在する理由は完全に解明されてはいないが、概ね次の原因によるものと考えられる。図19に電気角検出時の磁界の様子を示す。モータには回転子の永久磁石による磁界と、巻線に流れる電流による磁界の双方を合成した磁界が生じている。想定した電気角に誤差がない場合、q軸に電圧を印加すれば、図19に示す通り、q軸方向にベクトル $q1$ からなる磁界が生じ、ベクトル $d1$ で表される永久磁石による磁界との合成の結果、ベクトル $\phi 1$ からなる磁界を生じる。このとき、磁界 $\phi 1$ の大きさは、次式(9)で表される。

$$\phi 1 = \sqrt{(d1^2 + q1^2)} \quad \dots (9)$$

但し、上記「 $\wedge$ 」はべき乗を示す演算子とする。

【0036】一方、想定した電気角に誤差がある場合、印加された電圧により図19の $\delta$ 軸方向にベクトル $\delta 1$ からなる磁界が生じる。永久磁石による磁界はベクトル $d1$ であるから、この場合には両者の合成によりベクトル $\phi 2$ からなる磁界を生じる。通電される電流値は上述した電気角の誤差がない場合と同じであるため、ベクトル $q1$ とベクトル $\delta 1$ の大きさは等しい。これらのベクトルの大きさを $q1$ で表すものとするれば、磁界 $\phi 2$ の大きさは、次式(10)で表される。

$$\dots (10)$$

味している。図12の領域Bに示される通り、かかる領域で磁束密度が高くなれば、インダクタンスは小さくなるため電流が流れやすくなる。このようなメカニズムによって図18に示すように誤差角に応じてq軸方向の電流値が一義的に決まるものと考えられる。

【0038】なお、上述の電気角検出装置において、前



記検出用電圧は正の電圧とすることが望ましい。

【0039】正の電圧を重畳するものとすれば、q 軸に流れる電流はトルク指令値に応じて流すべき電流を維持することができ、電気角検出時におけるトルク不足を回避することができる。

【0040】上述の電気角検出装置を利用した、本発明の第1のモータ制御装置は、多相交流を巻線に流した際に該巻線に生じる磁界と永久磁石による磁界との相互作用により回転子を回転させる同期モータを、前記回転子の回転中心を通り前記永久磁石による磁界に沿う方向であるd軸方向、および前記回転子の回転面内において前記d軸方向に電氣的に直交する方向であるq軸方向を定義する電気角に基づいて制御するモータ制御装置であって、前記モータが出力すべきトルクであるトルク指令値を読み込むトルク指令値読み込み手段と、電気角を想定し、該想定された電気角に基づいて定義されるd軸方向およびq軸方向にトルク指令値に応じた電圧を印加する電圧印加手段と、前記電圧印加手段により前記q軸方向に印加される電圧に対し、所定期間、所定の負の電圧を重畳して印加する制御を行う印加電圧制御手段と、前記d軸方向に磁界を生じるd軸電流、および前記q軸方向に磁界を生じるq軸電流のそれぞれについて、前記重畳された電圧に応じて生じる挙動を検出する電流検出手段と、該検出された電流の挙動に基づいて、前記モータの電気角を演算する電気角演算手段と、前記想定された電気角を該演算された電気角に更新する電気角更新手段とを備えることを要旨とする。

【0041】また、本発明の第2のモータ制御装置は、多相交流を巻線に流した際に該巻線に生じる磁界と永久磁石による磁界との相互作用により回転子を回転させる同期モータを、前記回転子の回転中心を通り前記永久磁石による磁界に沿う方向であるd軸方向、および前記回転子の回転面内において前記d軸方向に電氣的に直交する方向であるq軸方向を定義する電気角を、仮に想定した電気角と真の電気角との誤差を介して検出し、前記電流を流すために巻線に印加する電圧を該電気角に基づいて制御するモータ制御装置であって、前記モータが出力すべきトルクであるトルク指令値を読み込むトルク指令値読み込み手段と、電気角を想定し、該想定された電気角に基づいて定義されるd軸方向およびq軸方向に前記トルク指令値に応じた電圧を印加する電圧印加手段と、前記トルク指令値に応じて前記q軸方向に印加される電圧に対し、所定期間、所定の検出用電圧を重畳して印加する制御を行う印加電圧制御手段と、前記q軸方向に磁界を生じるq軸電流について、前記検出用電圧に応じて生じる挙動と前記誤差との関係を、前記トルク指令値に応じて予め記憶する記憶手段と、前記q軸電流について、前記検出用電圧に応じて生じる挙動を検出する電流検出手段と、該検出された電流の挙動に基づいて、前記記憶手段に記憶された関係を参照して前記誤差を求める

ことにより、前記モータの電気角を演算する電気角演算手段と、前記想定された電気角を該演算された電気角に更新する電気角更新手段とを備えることを要旨とする。

【0042】これらのモータ制御装置は、先に説明した電気角検出装置を利用しているため、モータの低速運転時における要求トルクが高トルクであっても、電気角を精度良く検出することができる。また、こうして検出された電気角を用いてモータ制御装置が想定していた電気角を更新する手段を備えているため、電圧印加手段は逐次d軸、q軸方向に適切に電圧を印加することができる。この結果、上記モータ制御装置によれば、モータの低速運転時において高トルクが要求された場合においても、モータを適切に制御することができる。

【0043】なお、上述した電気角検出装置および電気角検出方法、並びにモータ制御装置は、中心部にロータを備え、外周部にステータを備えるいわゆるインナロータ型の同期モータのみならず、いわゆるアウトロータと呼ばれるタイプの同期モータにも適用可能である。アウトロータ型の電動機は、中心部のステータと、その外周を円状に取り囲むようにロータとを備え、三相コイルに制御電流を流すことにより回転磁界が形成し、円環状のアウトロータを回転させる電動機である。

【0044】

【発明の実施の形態】(1)実施例の構成

以下、本発明の実施の形態について、実施例を用いて説明する。図1は、本発明の一実施例としての電気角検出装置を含むモータ制御装置10の概略構成を示すブロック図、図2は制御対象となっている三相同期モータ40の概略構成を示す説明図、図3はこの三相同期モータ40の固定子30と回転子50との関係を示す端面図である。

【0045】まず、図2を用いて、三相同期モータ40の全体構造について説明する。この三相同期モータ40は、固定子30と回転子50とこれらを収納するケース60とからなる。回転子50は、外周に永久磁石51ないし54が貼付されており、その軸中心に設けられた回転軸55を、ケース60に設けられた軸受61、62により回転自在に軸支している。

【0046】回転子50は、無方向性電磁鋼板を打ち抜いて成形した板状回転子57を複数枚積層したものである。この板状回転子57は、図3に示すように、直交する位置に4箇所の突極71ないし74を備える。板状回転子57を積層した後、回転軸55を圧入し、積層した板状回転子57を仮止めする。この電磁鋼板を素材とする板状回転子57は、その表面に絶縁層と接着層が形成されており、積層後所定温度に加熱され、接着層が溶融することにより、固定される。

【0047】こうして回転子50を形成した後、回転子50の外周面であって、突極71ないし74の中間位置に、永久磁石51ないし54を軸方向に亘って貼付す

る。永久磁石 51 ないし 54 は、回転子 50 の半径方向に磁化されており、その極性は隣り合う磁石同士が互いに異なる磁極となっている。例えば、永久磁石 51 は外周面が N 極であり、その隣の永久磁石 52 は外周面が S 極となっている。この永久磁石 51, 52 は、回転子 50 を固定子 30 に組み付けた状態では、板状回転子 57 および板状固定子 20 を貫く磁路 Md を形成する（図 3 破線参照）。

【0048】固定子 30 を構成する板状固定子 20 は、板状回転子 57 と同じく無方向性電磁鋼板の薄板を打ち抜くことで形成されており、図 3 に示すように、計 12 個のティース 22 を備える。ティース 22 間に形成されたスロット 24 には、固定子 30 に回転磁界を発生させるコイル 32 が巻回されている。尚、板状固定子 20 の外縁部には、固定用のボルト 34 を通すボルト孔が設けられているが、図 3 では図示を省略してある。

【0049】固定子 30 は、板状の板状固定子 20 を積層し互いに押圧した状態として、接着層を加熱・溶融することで一応固定される。この状態で、コイル 32 をティース 22 に巻回して固定子 30 を完成した後、これをケース 60 に組み付け、ボルト孔に固定用のボルト 34 を通し、これを締め付けて全体を固定する。更に回転子 50 をケース 60 の軸受 61, 62 により回転自在に組み付けることにより、この三相同期モータ 40 は完成する。

【0050】固定子 30 のコイル 32 に回転磁界を発生するよう励磁電流を流すと、図 3 に示すように、隣接する突極および板状回転子 57, 板状固定子 20 を貫く磁路 Mq が形成される。尚、上述した永久磁石 51 により形成される磁束が回転子 50 を、その回転軸中心を通過して径方向に貫く軸を d 軸と呼び、回転子 50 の回転面内において前記 d 軸に電氣的に直交する軸を q 軸と呼ぶ。つまり、d 軸および q 軸は回転子 50 の回転に伴い回転する軸である。本実施例では、回転子 50 に貼付された永久磁石 51 および 53 は外周面が N 極となっており、永久磁石 52 および 54 は外周面が S 極となっていることから、図 3 に示す通り、幾何学的には d 軸と 45 度方向にある軸が q 軸となる。図 4 に本実施例の三相同期モータ 40 の等価回路を示す。図 4 に示す通り、三相同期モータ 40 は U, V, W の三相コイルと、回転軸中心回りに回転する永久磁石を有する等価回路により表される。d 軸はこの等価回路において永久磁石の N 極側を正方向として貫く軸として表され、q 軸は d 軸に対し幾何学的にも直交した軸として表される。また、電気角は U 相コイルを貫く軸と d 軸との回転角  $\theta$  となる。

【0051】次に、図 1 に従ってモータ制御装置 10 の構成について説明する。モータ制御装置 10 は、外部からのトルク指令を受けて三相同期モータ 40 の三相（U, V, W 相）のモータ電流を制御する制御用 ECU 100、三相同期モータ 40 の U 相電流 Au, V 相電流

Av, W 相電流 Aw を検出する電流センサ 102, 103, 104、検出された電流の高周波ノイズを除去するフィルタ 106, 107, 108、検出した電流値をデジタルデータに変換する 3 個のアナログデジタル変換器（ADC）112, 113, 114 から構成されている。

【0052】制御用 ECU 100 の内部には、図示するように、算術論理演算を行うマイクロプロセッサ（CPU）120、この CPU 120 が行う処理や必要なデータを予め記憶した ROM 122、処理に必要なデータ等を一時的に読み書きする RAM 124、計時を行うクロック 126 等が設けられており、バスにより相互に接続されている。このバスには、入力ポート 116 や出力ポート 118 も接続されており、CPU 120 は、これらのポート 116, 118 を介して、三相同期モータ 40 の U, V, W の各相に流れる電流 Au, Av, Aw を読み込むことができる。

【0053】また、制御用 ECU 100 には、別途入力されるトルク指令に基づいて決定されたモータ 40 の各相電流 Au, Av, Aw が得られるようモータ 40 の各コイル間に電圧を印加する電圧印加部 130 が、その出力部に設けられている。CPU 120 からの制御出力 Vu, Vv, Vw, SD が、この電圧印加部 130 に出力されており、三相同期モータ 40 の各コイルに印加される電圧を外部から制御することが可能となっている。

【0054】以上に示したモータ制御装置 10 の構成の内、電流センサ 102~104、フィルタ 106~108、ADC 112~114、電圧印加部 130 および制御用 ECU 100 が電気角検出装置に対応する。

#### 【0055】（2）モータの電流制御

次に本実施例におけるモータ制御装置 10 における電流制御について図 4 を用いて説明する。図 4 において U 相に電流 Au を流せば磁界が生じる。この磁界は U 相を貫く方向に生じ、かつその大きさは電流 Au に応じて変化する。従って、U 相電流は、この磁界の方向および大きさ Au をもつベクトル量として表すことができる。他の V 相および W 相に流れる電流 Av, Aw も同様にベクトル量として表すことができる。このように電流をベクトルとして考えると平面内の電流ベクトルは代表的な 2 方向の電流ベクトルの和として表される。この 2 方向を図 4 の  $\alpha$  方向、 $\beta$  方向にとれば、モータ回転面の任意の方向に生じる磁界に対応する電流ベクトルは、これらの 2 相コイルに流れる電流  $A\alpha$ ,  $A\beta$  を用いて表すことができる。具体的に、ある電流 Au, Av, Aw と等価な電流  $A\alpha$ ,  $A\beta$  は次式（11）により求めることができる。

$$A\alpha = Au - Av/2 - Aw/2$$

$$A\beta = \sqrt{3}/2 \cdot (Aw - Av) \quad \dots (11)$$

【0056】また、逆に  $A\alpha$ ,  $A\beta$  が求まっているとき、U, V, W 相の電流の総和が 0 ( $Au + Av + Aw$

= 0) となる条件を用いれば、次式 (12) により各相

$$A_u = 2 (\sqrt{3} - 3) \cdot A_\alpha / 3$$

$$A_v = (3 - \sqrt{3}) \cdot (A_\alpha - A_\beta) / 3$$

$$A_w = (3 - \sqrt{3}) \cdot (A_\alpha + A_\beta) / 3 \quad \dots (12)$$

これが、一般に知られている 3 相 / 2 相変換である。以下、簡単のために 2 相変換した後の電流  $A_\alpha$ 、 $A_\beta$  を用いて、モータ 40 の電流制御について説明する。

【0057】上述の電流ベクトルは、図 4 における d 軸

$$A_d = A_\alpha \cdot \cos \theta + A_\beta \cdot \sin \theta$$

$$A_q = -A_\alpha \cdot \sin \theta + A_\beta \cdot \cos \theta \quad \dots (13)$$

【0058】逆に、 $A_d$ 、 $A_q$  が求まっていれば、 $A_\alpha$ 、 $A_\beta$  は次式 (14) により求められる。

$$A_\alpha = A_d \cdot \cos \theta - A_q \cdot \sin \theta$$

$$A_\beta = A_d \cdot \sin \theta + A_q \cdot \cos \theta \quad \dots (14)$$

【0059】以上より、モータ 40 の d 軸、q 軸方向に流す電流が求まれば、式 (14) より 2 相電流  $A_\alpha$ 、 $A_\beta$  を求めることができ、さらに式 (12) により実際に U、V、W 相に流すべき電流を求めることができる。また、U、V、W 相に印加すべき電圧を求めることもできる。本実施例におけるモータ 40 の電流制御はこのような考え方に基いてなされている。もっとも、 $\alpha$  方向、 $\beta$  方向を介在させることなく、直接 d 軸、q 軸方向と U、V、W 相電流との関係を求めて制御するものとしてもよい。以下の説明において、例えば「d 軸、q 軸電流」という場合には、上記考え方に基づく電流ベクトルの大きさを意味している。なお、このようにモータ 40 に流れる電流を d 軸、q 軸方向に分けて考えるとき、一般的に q 軸電流がモータ 40 のトルクを主に支配する電流となることが知られている。

【0060】(3) 第 1 実施例における低速時モータ制御処理

次に本実施例のモータ制御処理について図 5 を用いて具体的に説明する。図 5 は、低速運転状態にあるモータ 40 を制御する低速時制御ルーチンの流れを示すフローチャートである。このルーチンは、図 1 に示した制御用 ECU 100 の CPU 120 が他の制御処理と共に周期的に実行するルーチンである。

【0061】低速時制御ルーチンが開始されると、CPU 120 はトルク指令値を読み込み (ステップ S100)、そのトルク指令値が所定のトルク値 T1 よりも大きいのか否かを判定する (ステップ S200)。後述する通り、トルク指令値の高低に応じて、電気角検出処理のルーチンを使い分けるためである。トルク指令値は、入力ポート 116 を介して外部から入力されるものであってもよいし、外部から入力される種々のデータに基づいて CPU 120 が算出するものとしてもよい。なお、ステップ S200 の判定においては、トルク指令値がトルク値 T1 付近である場合におけるいわゆるチャタリングを防止するために、ヒステリシスを設けることが望ましい。

【0062】所定のトルク値 T1 については、以下に説

の電流  $A_u$ 、 $A_v$ 、 $A_w$  を求めることもできる。

方向および q 軸方向に生じる磁界に対しても定義することができる。d 軸方向および q 軸方向の電流ベクトルの大きさを  $A_d$ 、 $A_q$  とすると、 $\alpha$  方向、 $\beta$  方向の電流  $A_\alpha$ 、 $A_\beta$  を用いて、次式 (13) により表される。

$A_\alpha$ 、 $A_\beta$  は次式 (14) により求められる。

明する低トルク時の電気角検出処理が適用できなくなるトルク値を実験的に求めればよい。本実施例では、電気角が確実に検出できるように、かかるトルク値よりも若干低いトルク値を T1 としている。

【0063】トルク指令値が所定のトルク値 T1 よりも低い場合には、低トルク時電気角検出処理を実行する (ステップ S300)。ここで、図 6 および図 7 に基づき、低トルク時電気角検出処理ルーチンの内容について説明する。図 6 は低トルク時電気角検出処理ルーチンの流れを示すフローチャートであり、図 7 は低トルク時電気角検出処理ルーチンにおいて  $\gamma$  軸方向に印加される電圧パルスおよび d 軸、q 軸に流れる電流の様子を示すグラフである。

【0064】低トルク時電気角検出処理ルーチンが開始されると、CPU 120 は、図 4 に示す  $\gamma$  軸、 $\delta$  軸方向の電流の初期値  $I_\gamma 0$ 、 $I_\delta 0$  を検出する (ステップ S305)。CPU 120 は、U、V、W 各相の電流を検出する電流センサ 102、103、104 により出力された信号を、フィルタ 106、107、108 および ADC 112、113、114 を介して入力ポート 116 から入力し、先に「(2) モータの電流制御」において説明した演算に基づいて、U、V、W 相から  $\gamma$  軸、 $\delta$  軸方向への変換を行うことにより、これらの電流値を検出する。d 軸、q 軸は図 4 に示した通り、モータ 40 の電気角が定まらなと定義できないため、CPU 120 は想定された電気角  $\theta_c$  に基づいて  $\gamma$  軸、 $\delta$  軸を想定し、その電流値を検出しているのである。従って、想定している電気角  $\theta_c$  と現実の電気角  $\theta$  との間には、図 4 に示すように誤差角  $\Delta\theta$  が存在する。初期状態においては図 7 に示す通り、トルク指令値に応じて、 $\delta$  軸には正の電流が流れており、 $\gamma$  軸には負の電流が流れている。 $\gamma$  軸に負の電流を流すのは、本実施例のように d 軸方向のインダクタンス  $L_d$  が、q 軸方向のインダクタンス  $L_q$  よりも小さいモータにおいては、d 軸の負の方向に電流を流すことにより、モータにいわゆる正のリラクタンストルクを発生させることができるからである。

【0065】次に、CPU 120 は、 $\gamma$  軸方向に電圧  $\Delta$

$V_\gamma$ を出力し(ステップS310)、サンプリングタイム $t_s$ の経過を待つ(ステップS315)、電流値 $I_\gamma 1$ 、 $I_\delta 1$ を検出する(ステップS320)。電流を検出するサンプリングタイム $t_s$ は、コイル巻線に流れる電流の挙動を十分検知することができる値を実験的に設定したものである。なお、サンプリングタイムを設定する際に考慮すべき条件については後述する。また、時間 $t_s$ の経過待ち(ステップS315)は、CPU120がモータ40の運転を制御するための他のルーチンを実行する間に、時間 $t_s$ 毎に割り込み処理をかけて本ルーチンを実行することにより実現されている。なお、 $\gamma$ 軸方向の電圧 $\Delta V_\gamma$ は、図7に示す通り、初期状態において $\gamma$ 軸方向に印加されている電圧に $\Delta V_\gamma$ を重ねて印加される。これは $\gamma$ 軸方向に印加する電圧を $\Delta V_\gamma$ だけ増加することと同義である。

【0066】ここで、 $\gamma$ 方向に電圧を印加するのは、先に説明した通り、本実施例のような同期モータ40においては、 $q$ 軸方向の電流が主にトルクを支配するものであり、 $d$ 軸方向の電流がトルクに与える影響は比較的小さいためである。つまり、制御用ECU100が $d$ 軸であると想定する $\gamma$ 方向に電流を流すことにより、電気角検出時にトルクに与える影響を比較的小さく抑えることができるからである。図7においては、説明の便宜上、 $\delta$ 軸の電流も大きく変化するように示してあるが、現実にはこの変化量は非常に小さいものである。

【0067】次のステップにおいて、CPU120は、 $\gamma$ 軸方向に電圧 $-\Delta V_\gamma$ を出力し(ステップS325)、サンプリングタイム $t_s$ の経過を待つ(ステップS330)、電流値 $I_\gamma 2$ 、 $I_\delta 2$ を検出する(ステップS335)。 $\gamma$ 軸方向に印加する電圧 $-\Delta V_\gamma$ は、初期状態における電圧に重ねて出力される。従って、図7から明らかな通り、電流値 $I_\gamma 1$ 、 $I_\delta 1$ を検出した時点から電圧値を $2 \cdot \Delta V_\gamma$ だけ減じて $\gamma$ 軸方向に電圧を印加すること、または初期状態から $\Delta V_\gamma$ だけ減じて電圧を印加することと同義である。

【0068】なお、ステップS330におけるサンプリングタイム $t_s$ はCPU120に割り込み処理をかける関係上、ステップS315におけるサンプリングタイム $t_s$ と同じ時間としているが、両者は異なるものとしてもよい。また、サンプリングタイムを一定の時間とせず、一定の期間とし、例えば、サンプリングタイムを一定の時間とせず、CPU120が他のまとまった処理を一通り終えた時点で電流値を検出するものとしてもよい。

【0069】以上により、検出された電流値を用いてCPU120は電流変化量を算出する(ステップS340)。具体的には、初期電流からステップS320における検出電流への変化量 $\Delta I_\gamma 1 (= I_\gamma 1 - I_\gamma 0)$ 、 $\Delta I_\delta 1 (= I_\delta 1 - I_\delta 0)$ と、ステップS320での検出電流からステップS335での検出電流へ

の変化量 $\Delta I_\gamma 2 (= I_\gamma 2 - I_\gamma 1)$ 、 $\Delta I_\delta 2 (= I_\delta 2 - I_\delta 1)$ との平均により、それぞれの電流変化量 $\Delta I_\gamma$ 、 $\Delta I_\delta$ を算出する。このように電流変化量に平均値を用いるのは、電流変化量の検出精度を向上するためである。 $\Delta I_\gamma 1$ 、 $\Delta I_\delta 1$ と $\Delta I_\gamma 2$ 、 $\Delta I_\delta 2$ の符号の相違を考慮すれば、平均の電流変化量を算出する式は、次式(15)となる。

$$\Delta I_\gamma = (\Delta I_\gamma 1 - \Delta I_\gamma 2) / 2$$

$$\Delta I_\delta = (\Delta I_\delta 1 - \Delta I_\delta 2) / 2 \quad \dots (15)$$

【0070】なお、本実施例ではサンプリングタイム $t_s$ を一定の時間で統一しているため、 $\Delta I_\gamma 1$ 、 $\Delta I_\delta 1$ と $\Delta I_\gamma 2$ 、 $\Delta I_\delta 2$ との平均を求めればよいが、両者のサンプリングタイムが相違する場合には、 $\Delta I_\gamma 1$ 、 $\Delta I_\delta 1$ と $\Delta I_\gamma 2$ 、 $\Delta I_\delta 2$ をそれぞれサンプリングタイムで除して、電流変化率に変換した上で平均値を求める必要がある。また、図1の電圧印加部130にトランジスタインバータを用いている場合等には、いわゆるデッドタイムロスにより、コイル巻線に電圧が印加される時間が、本来印加されるべき時間よりも長くなったり短くなったりする場合が生じ得るため、これを補正できる方程式を用いて、正確な電流変化量を求めるものとしてもよい。かかる方程式の算出方法等についての詳細な説明は省略するが、例えば出願人が別途出願をしている技術等(特願平9-241980に記載されている技術)が挙げられる。

【0071】後述する通り、電気角の算出に必要なものは、電流の変化率 $\Delta I_\gamma$ 、 $\Delta I_\delta$ の比である。従って、図6のステップS325からS335までを省略し、電流変化率を上記 $\Delta I_\gamma 1$ 、 $\Delta I_\delta 1$ のみにより求めるものとしてもよい。かかる方法を採用することにより電気角検出処理に要する時間を短縮することができる。特に、 $\Delta I_\gamma 1$ 、 $\Delta I_\delta 1$ に含まれる誤差が一致しており、両者の比をとることによりその誤差を相殺することができるような場合には、かかる処理を採用することが望ましい。

【0072】次に、想定した電気角 $\theta_c$ が存在する誤差角の範囲について、CPU120は電流変化量に基づいた区間判定を行う(ステップS345)。区間判定について、図8を用いて説明する。図8は横軸にCPU120が想定した電気角 $\theta_c$ と現実の電気角 $\theta$ との誤差角 $\Delta \theta (= \theta - \theta_c)$ をとり、各 $\Delta \theta$ に対する電流変化量をプロットしたものである。電流変化量 $\Delta I_\gamma$ 、 $\Delta I_\delta$ は先に式(3)、(4)で示した通り、 $\Delta I_\gamma = \Delta V_\gamma \cdot t (A + \Delta I \cdot \cos 2\Delta \theta)$ (式(3))および $\Delta I_\delta = \Delta V_\gamma \cdot t \cdot \Delta I \cdot \sin 2\Delta \theta$ (式(4))と表される。ここで、 $A = (1/L_d + 1/L_q) / 2$ であり、 $\Delta I = (1/L_d - 1/L_q) / 2$ である。 $\Delta I_\gamma A = \Delta I_\gamma - \Delta V_\gamma \cdot t \cdot A$ とすれば、 $\Delta I_\gamma A$ は、次式(16)により表される。

$$\begin{aligned}\Delta I \gamma A &= \Delta I \gamma - \Delta V \gamma \cdot t \cdot A \\ &= \Delta V \gamma \cdot t \cdot \Delta I \cdot \cos 2\Delta\theta \quad \dots (16)\end{aligned}$$

図8では、 $\Delta I \gamma A$ と $\Delta I \delta$ を示している。

【0073】CPU120は $\gamma$ 方向に電圧を印加しているため、誤差角 $\Delta\theta=0$ のときは $\Delta I \delta=0$ となる。

(16)式、(4)式で説明した通り、 $\Delta I \gamma A$ 、 $\Delta I \delta$ は理論的には、誤差角 $\Delta\theta$ に応じて、それぞれ $\cos$ 関数および $\sin$ 関数に従って変化する。

【0074】次に、誤差角 $\Delta\theta$ が $-180$ 度 $\sim 180$ 度の範囲を16等分した区間を、図8に示す通り区間1 $\sim$ 区間16とすると、 $\Delta I \gamma A + \Delta I \delta$ および $\Delta I \gamma A - \Delta I \delta$ の正負に応じて、誤差角 $\Delta\theta$ の範囲が次の通り判定できる。

CASE1： $\Delta I \gamma A + \Delta I \delta > 0$ 、 $\Delta I \gamma A - \Delta I \delta > 0$ のとき、

誤差角が属する区間=区間1, 8, 9, 16

CASE1:

$$\Delta\theta = \Delta I \delta / (2 \cdot \Delta I \gamma A) \quad \dots (17)$$

$$\Delta\theta = \Delta I \delta / (2 \cdot \Delta I \gamma A) + \pi \quad \dots (18)$$

CASE2:

$$\Delta\theta = -\Delta I \gamma A / (2 \cdot \Delta I \delta) + \pi/4 \quad \dots (19)$$

$$\Delta\theta = -\Delta I \gamma A / (2 \cdot \Delta I \delta) + 5\pi/4 \quad \dots (20)$$

CASE3:

$$\Delta\theta = \Delta I \delta / (2 \cdot \Delta I \gamma A) + \pi/2 \quad \dots (21)$$

$$\Delta\theta = \Delta I \delta / (2 \cdot \Delta I \gamma A) + 3\pi/2 \quad \dots (22)$$

CASE4:

$$\Delta\theta = -\Delta I \gamma A / (2 \cdot \Delta I \delta) + 3\pi/4 \quad \dots (23)$$

$$\Delta\theta = -\Delta I \gamma A / (2 \cdot \Delta I \delta) + 7\pi/4 \quad \dots (24)$$

【0076】CASE1からCASE4のそれぞれにおいて、 $\Delta\theta$ の算出式が2つずつあるのは(例えば、CASE1には、式(17)と式(18)がある)、次の理由による。具体的に、誤差角 $\Delta\theta$ がCASE1に存在すると判断された場合について考えると、図8から明らかな通り、区間1と区間9では電流 $\Delta I \gamma A$ 、 $\Delta I \delta$ の比が同じ値となる。区間8と区間16も同様である。つまり、 $\Delta I \gamma A$ 、 $\Delta I \delta$ に基づく演算のみでは、電気角が $\pi$ だけずれた2つの解が存在することになるのである。

【0077】本実施例では、誤差角が $-90$ 度から $90$ 度の範囲からはみ出さないような周期で電気角検出処理を実行することにより上記問題を解決している。つまり、電気角検出処理の実行周期は、モータ40が $90$ 度回転するのに要する時間よりも短くなっている。図6のステップS315、S330におけるサンプリングタイムもかかる制限を考慮した範囲で設定されており、数 $\text{msec}$ のサンプリングタイムを用いている。かかる前提の下、本実施例では、上式(17)、(19)、(21)、(23)のみを用いて電気角を検出するものとしている。

【0078】一方、本実施例の電気角検出方法に加え、誤差角が $-90$ 度から $90$ 度の範囲に存在するの

CASE2： $\Delta I \gamma A + \Delta I \delta > 0$ 、 $\Delta I \gamma A - \Delta I \delta < 0$ のとき、

誤差角が属する区間=区間2, 3, 10, 11

CASE3： $\Delta I \gamma A + \Delta I \delta < 0$ 、 $\Delta I \gamma A - \Delta I \delta < 0$ のとき、

誤差角が属する区間=区間4, 5, 12, 13

CASE4： $\Delta I \gamma A + \Delta I \delta < 0$ 、 $\Delta I \gamma A - \Delta I \delta > 0$ のとき、

誤差角が属する区間=区間6, 7, 14, 15

【0075】こうして判定された区間に基づいて、CPU120は、誤差角 $\Delta\theta$ を算出する(ステップS350)。誤差角 $\Delta\theta$ の算出は、 $\Delta\theta$ が比較的小さい範囲で成立する近似式を用いて、上記CASE1 $\sim$ CASE4に応じて次式(17) $\sim$ (24)により行われる。

か、他の範囲に存在するのかを判定する、いわゆる極性判定を行うものとしてもよい。かかる極性判定方法としては、種々の方法があり、例えば、本出願人が別途出願している、例えば特開平7-177788および特願平9-220105に記載の技術等を用いることができる。極性判定を行うものとするれば、誤差角を $-180$ 度から $180$ 度の範囲で一義的に決定することができる。

【0079】次に、CPU120は、上式により算出された $\Delta\theta$ を用いて想定している電気角 $\theta_c$ を補正する(ステップS355)。具体的には、 $\theta_c + \Delta\theta$ を演算し、新たな電気角 $\theta_c$ とするのである。以上により低トルク時の電気角検出処理(図5のステップS300)を一旦終了し、低速時制御ルーチンに戻る。次のステップで、CPU120は、検出された電気角に基づいて、モータ電流制御を行う(ステップS500)。モータ電流制御においてCPU120は、先に「(2)モータの電流制御」において説明した通り、トルク指令値に応じてモータ40に流すべきd軸電流、q軸電流を決定し、2相/3相変換してU、V、W相に流すべき電流を決定するのである。

【0080】次に、図5のステップS200において、トルク指令値が所定のトルク値T1よりも大きい場合に

ついて説明する。このときは、CPU120は、高トルク時電気角検出処理を行う（ステップS400）。先に説明した低トルク時電気角検出処理では、高トルク時に電気角を精度良く検出することができないからである。図9および図10に基づき、高トルク時電気角検出処理ルーチンの内容について説明する。図9は高トルク時電気角検出処理ルーチンの流れを示すフローチャートであり、図10は高トルク時電気角検出処理ルーチンにおいてδ軸に印加される電圧パルスおよびd軸、q軸に流れる電流の様子を示すグラフである。

【0081】高トルク時電気角検出処理ルーチンが開始されると、CPU120は、γ軸およびδ軸方向の電流初期値 $I_{\gamma 0}$ 、 $I_{\delta 0}$ を検出し（ステップS405）、δ軸に $-\Delta V_{\delta}$ なる電圧を印加する（ステップS410）。これは、初期状態の電圧に $-\Delta V_{\delta}$ なる負の電圧を重畳して印加するものであり、初期状態の電圧を $-\Delta V_{\delta}$ だけ減じて印加することと同義である。先に説明した低トルク時電気角検出処理ルーチンにおいては、γ軸に正の電圧を重畳して印加したのに対し、本ルーチンでは、δ軸に負の電圧を重畳して印加する点が相違する。

【0082】高トルクが要求されている時は、初期状態においてδ軸方向に大きな電流が流れているため、磁気飽和現象により、q軸のインダクタンス $L_q$ がd軸のインダクタンス $L_d$ よりも小さくなっている。この様子を図12に示す。図12は、電流も含めた外部磁界Hと磁束密度Bとの関係を示したグラフであり、q軸に対応する曲線Cqおよびd軸に対応する曲線Cdの各点における接線の傾きがそれぞれインダクタンス $L_q$ 、 $L_d$ に相当する。高トルクの場合の初期状態は、Cqが非線形性を示している領域Bにあることになる。従って、制御用ECU100がq軸と想定しているδ軸に負の電圧を重畳して印加することにより、q軸の磁気飽和を緩和し、線形性が保たれている領域Aに移行させて、電気角の検出を可能にしているのである。

【0083】CPU120はサンプリングタイム $t_s$ の経過を待って（ステップS415）、γ軸、δ軸方向の電流値 $I_{\gamma 1}$ 、 $I_{\delta 1}$ を検出する（ステップS420）。本実施例では、サンプリングタイム $t_s$ は、低ト

$$\begin{aligned}\Delta I_{\delta A} &= \Delta V_{\delta} \cdot t \cdot A - \Delta I_{\delta} \\ &= \Delta V_{\delta} \cdot t \cdot \Delta I \cdot \cos 2\Delta\theta \cdots (25)\end{aligned}$$

図11では、 $\Delta I_{\gamma}$ と $\Delta I_{\delta A}$ を示している。

【0087】CPU120はγ方向に電圧を印加しているため、誤差角 $\Delta\theta = 0$ のときは $\Delta I_{\delta} = 0$ となる。

(7)式、(25)式で説明した通り、 $\Delta I_{\gamma}$ 、 $\Delta I_{\delta A}$ は理論的には、誤差角 $\Delta\theta$ に応じて、それぞれ $\sin$ 関数および $\cos$ 関数に従って変化する。

【0088】次に、誤差角 $\Delta\theta$ が $-180$ 度 $\sim 180$ 度の範囲を16等分した区間を、図8に示す通り区間1 $\sim$ 区間16とすると、 $\Delta I_{\gamma} + \Delta I_{\delta A}$ および $\Delta I_{\gamma} - \Delta I_{\delta A}$ の正負に応じて、誤差角 $\Delta\theta$ の範囲が次の通り判

ル時電気角検出処理ルーチンと一致させてあるが、必ずしも一致している必要はない。

【0084】次に、CPU120はδ軸方向に $\Delta V_{\delta}$ なる電圧を印加し（ステップS425）、サンプリングタイム $t_s$ の経過を待った後（ステップS430）、γ軸、δ軸方向の電流値 $I_{\gamma 2}$ 、 $I_{\delta 2}$ を検出する（ステップS435）。また、こうして検出された電流値を用いて電流変化量 $\Delta I_{\gamma}$ 、 $\Delta I_{\delta}$ を算出する（ステップS440）。電流変化量の算出は、低トルク時電気角検出処理ルーチン（図6）のステップS340と同様である。

【0085】なお、低トルク時電気角検出処理において説明した通り、後の電気角検出に用いられるのは、上記電流変化量 $\Delta I_{\gamma}$ 、 $\Delta I_{\delta}$ のみである。従って、図9のステップS425からS435を省略し、初期電流 $I_{\gamma 0}$ 、 $I_{\delta 0}$ および電流値 $I_{\gamma 1}$ 、 $I_{\delta 1}$ （ステップS420）を用いて電流変化量を求めるものとしてもよい。特に、高トルク時電気角検出処理においては、正の電圧印加中（ステップS425、S430）において、q軸方向に再び磁気飽和が生じ、δ軸方向の電流が非線形に変化する可能性もある。従って、かかるおそれを回避するためにも、上記ステップS425からS435を省略することが好ましい場合もある。

【0086】以上より算出された電流変化量 $\Delta I_{\gamma}$ 、 $\Delta I_{\delta}$ に基づいて、CPU120は誤差角 $\Delta\theta$ が存在する区間の判定を行う（ステップS445）。区間判定方法は、低トルク時電気角検出処理ルーチンと相違するため、図11を用いて説明する。図11は横軸にCPU120が想定した電気角 $\theta_c$ と現実の電気角 $\theta$ との誤差角 $\Delta\theta$ をとり、各 $\Delta\theta$ に対する電流変化量をプロットしたものである。電流変化量 $\Delta I_{\gamma}$ 、 $\Delta I_{\delta}$ は先に式

(7)、(8)で示した通り、 $\Delta I_{\gamma} = \Delta V_{\delta} \cdot t \cdot \Delta I \cdot \sin 2\Delta\theta$ （式(7)）および $\Delta I_{\delta} = \Delta V_{\delta} \cdot t \cdot \Delta I \cdot (A - \cos 2\Delta\theta)$ （式(8)）と表される。ここで、 $A = (1/L_d + 1/L_q) / 2$ であり、 $\Delta I = (1/L_d - 1/L_q) / 2$ である。 $\Delta I_{\delta A} = \Delta V_{\delta} \cdot t \cdot A - \Delta I_{\delta}$ とすれば、 $\Delta I_{\delta A}$ は、次式(25)により表される。

定できる。

CASE1： $\Delta I_{\gamma} + \Delta I_{\delta A} > 0$ 、 $\Delta I_{\gamma} - \Delta I_{\delta A} > 0$ のとき、

誤差角が属する区間＝区間2，3，10，11

CASE2： $\Delta I_{\gamma} + \Delta I_{\delta A} > 0$ 、 $\Delta I_{\gamma} - \Delta I_{\delta A} < 0$ のとき、

誤差角が属する区間＝区間1，8，9，16

CASE3： $\Delta I_{\gamma} + \Delta I_{\delta A} < 0$ 、 $\Delta I_{\gamma} - \Delta I_{\delta A} < 0$ のとき、

誤差角が属する区間＝区間6，7，14，15

CASE 4:  $\Delta I \gamma + \Delta I \delta A < 0$ 、 $\Delta I \gamma - \Delta I \delta A > 0$  のとき、

誤差角が属する区間=区間4, 5, 12, 13

【0089】こうして判定された区間に基づいて、CP

CASE 1:

$$\Delta \theta = \Delta I \delta / (2 \cdot \Delta I \gamma A) + \pi / 4 \quad \dots (26)$$

$$\Delta \theta = \Delta I \delta / (2 \cdot \Delta I \gamma A) + 5\pi / 4 \quad \dots (27)$$

CASE 2:

$$\Delta \theta = -\Delta I \gamma A / (2 \cdot \Delta I \delta) \quad \dots (28)$$

$$\Delta \theta = -\Delta I \gamma A / (2 \cdot \Delta I \delta) + \pi \quad \dots (29)$$

CASE 3:

$$\Delta \theta = \Delta I \delta / (2 \cdot \Delta I \gamma A) + 3\pi / 4 \quad \dots (30)$$

$$\Delta \theta = \Delta I \delta / (2 \cdot \Delta I \gamma A) + 7\pi / 4 \quad \dots (31)$$

CASE 4:

$$\Delta \theta = -\Delta I \gamma A / (2 \cdot \Delta I \delta) + \pi / 2 \quad \dots (32)$$

$$\Delta \theta = -\Delta I \gamma A / (2 \cdot \Delta I \delta) + 3\pi / 2 \quad \dots (33)$$

【0090】上記CASE 1からCASE 4においても、低トルク時電気角検出処理と同様、電気角を算出する式がそれぞれ2つずつ存在する。本実施例では、低トルク時電気角検出処理と同様、電気角検出処理を実行する周期を適切な値に設定することにより、上式(26)、(28)、(30)、(32)のみを用いて電気角を求めるものとしている。先に説明した通り、いわゆる極性判定を行うことにより、電気角を $-180$ 度から $180$ 度の範囲で一義的に検出できるようにしてもよい。

【0091】CPU 120は、上式により算出された $\Delta \theta$ を用いて想定している電気角 $\theta_c$ を補正し(ステップS455)、高トルク時の電気角検出処理(図5のステップS400)を一旦終了する。こうして、低速時制御ルーチンに戻った後、次のステップで、CPU 120は、検出された電気角に基づいて、モータ電流制御を行う(ステップS500)。モータ電流制御については既に説明した。

【0092】なお、図5のフローチャートでは便宜上、モータ電流制御と電気角の検出処理とを一つのフローチャートで示しており、両者は同じ周期で実行されるものとして示しているが、モータ40を滑らかに回転するため、実際にはモータ電流制御は電気角検出処理よりも細かい周期で実行されている。本実施例では電気角検出処理が行われる時間間隔の $1/4$ 倍の時間間隔で実行している。電気角検出処理が実行されない場合のモータ電流制御は、それまでに検出されていた電気角の変化を外挿して求められた電気角に基づいて行われる。この外挿方法について図13を用いて説明する。

【0093】図13は、モータ40が低速回転している場合に、時間の経過とともに電気角が増えていく様子を示した図である。図13において、時間間隔 $\Delta t_m$ ごとに「○」で示した $m1 \sim m5$ なるポイントで電気角検出処理が実行されることを示している。また、時間間隔 $\Delta$

U120は、誤差角 $\Delta \theta$ を算出する(ステップS450)。誤差角 $\Delta \theta$ の算出は、 $\Delta \theta$ が比較的小さい範囲で成立する近似式を用いて、上記CASE 1~CASE 4に応じて次式(26)から(33)により行われる。

$t_n$ ごとに「○」で示した $n1 \sim n3$ なるポイントでは、電気角検出処理は実行されないが、モータ電流制御が実行されることを示している。本実施例では、 $\Delta t_m = 4 \times \Delta t_n$ である。

【0094】ポイント $n1$ でモータ電流制御をする場合、そこでの電気角 $N1$ を求める必要がある。本実施例では、図13のポイント $m1 \sim m4$ に基づいて算出される電気角の平均の変化率 $\Delta m_{av}$ と、時間間隔 $\Delta t_n$ およびポイント $m4$ での電気角 $M4$ に基づき、 $N1 = \Delta m_{av} \times \Delta t_n + M4$ なる演算により算出している。同様に、ポイント $n2$ ,  $n3$ の電気角は、それぞれ $\Delta t_n$ に代えて、 $2 \times \Delta t_n$ ,  $3 \times \Delta t_n$ を用いることにより算出している。

【0095】また、ここで用いられる電気角の平均の変化率 $\Delta m_{av}$ は、ポイント $m1$ から $m2$ の電気角の変化率 $\Delta m1$ 、ポイント $m2$ から $m3$ の電気角の変化率 $\Delta m2$ 、ポイント $m3$ から $m4$ の電気角の変化率 $\Delta m3$ の平均をとって求めている。つまり、 $\Delta m_{av} = (\Delta m1 + \Delta m2 + \Delta m3) / 3$ である。電気角の変化率とは、各区間での電気角の変化量を時間間隔 $\Delta t_m$ で除したものであり、その区間におけるモータ40の平均角速度に相当する。かかる外挿を用いれば、次の電気角検出タイミングとなるポイント $m5$ における電気角も想定することができる。こうして想定された電気角が図4における $\theta_c$ である。

【0096】このように電気角検出処理よりも細かな周期でモータ電流制御を行うことにより、ポイント $n1 \sim n3$ における電気角には若干の誤差が含まれているものの、モータ40の運転を滑らかに制御することができる。なお、上記モータ電流制御の間隔や平均の変化率を算出するために用いるポイント $m1$ ,  $m2$ ,  $\dots$ の数等は、モータ電流制御に要求される電気角の想定精度やCPU 120の処理速度等に応じて適宜定めることができる。

【0097】以上で説明した電気角検出装置およびモータ制御装置 10 によれば、モータ 40 の低速運転時において、トルク指令値が高トルクであっても電気角を精度良く検出でき、モータ 40 を適切に制御することができる。なお、高トルク時電気角検出処理（図 5 のステップ S 400）において、モータ 40 のトルクを主に支配する  $q$  軸方向に負の電圧を印加するため、瞬間的にトルクの減少を生じる可能性もあるが、モータ 40 のトルク指令値が所定値以上である場合にのみ  $q$  軸方向に電圧を印加するため、かかるトルク変動を最小限に抑えることができる。

【0098】もっとも、電気角検出処理は非常に短期間で終了する処理であるため、トルク指令値と所定のトルク値  $T_1$  との大小を比較する判断（図 5 のステップ S 200）を省略し、トルク指令値に関わらず高トルク時電気角検出処理（図 5 のステップ S 400）により電気角の検出をするものとしてもよい。さらに、トルク指令値に関わらず、常に低トルク時電気角検出処理と高トルク時電気角検出処理の双方を実行するものとし、モータ 40 の電気角検出結果が連続的に変化するように、両者の演算結果のうち一つを選択するものとしてもよい。かかる手段は、トルク指令値がトルク値  $T_1$  付近となり、図 5 に示したルーチンにおいて、低トルク時電気角検出処理と高トルク時電気角検出処理とが切り替わる遷移領域において電気角を安定して検出するのに有効である。従って、かかる遷移領域においてのみ両者を実行するようにしてもよい。

【0099】一方、上記の電気角検出装置は、高トルク時電気角検出処理において、 $q$  軸に負の電圧を重畳して印加した後、正の電圧を重畳して印加する（図 10 参照）。この結果、負の電圧を重畳して印加することにより減少した  $q$  軸方向の電流を、要求トルクに応じた所定の電流値まで早期に回復することができ、電気角検出中におけるトルク変動の影響を抑えることができる。本実施例では、電流変化率を精度良く算出する目的から、図 9 のステップ S 425 における正の印加電圧と、ステップ S 410 における負の印加電圧について、電圧の絶対値および電圧印加時間を同一にしているが、正の印加電圧について電圧値および電圧印加時間をトルク変動を抑える上記目的に合わせた適切な値に設定してもよい。

【0100】なお、上記の電気角検出装置による高トルク時電気角検出処理において印加する電圧値  $\Delta V_\delta$  または電圧の印加時間をトルク指令値に応じて変化するものとしてもよい。図 12 を用いて説明する。具体的には、トルク指令値が所定のトルク値  $T_1$  を大きく越える値（図 12 の点 c）である場合には、印加する電圧値  $\Delta V_\delta$  を大きい値とし、トルク指令値が小さくなる（図 12 の点 b）につれて印加する電圧値  $\Delta V_\delta$  を減少するものとしてもよい。

【0101】トルク指令値と電圧値  $\Delta V_\delta$  との関係を図

14～図 16 に示す。印加する電圧の絶対値が、図 14 に示す通りトルク指令値の減少に応じて直線的に減少するものの他、図 15 に示す通り曲線的に減少するものや図 16 に示す通り段階的に減少するものであってもよい。また、印加する電圧の絶対値および電圧印加時間の一方のみを減少するものとしてもよいし、双方を減少するものとしてもよい。

【0102】かかる電気角検出装置およびモータ制御装置 10 によれば、モータ 40 に要求されるトルク指令値が小さくなるにつれて、前記重畳して印加する電圧の絶対値および電圧印加時間の少なくとも一方を小さくすることができる。この結果、高トルク時に  $q$  軸のインダクタンスを線形領域（図 12 の領域 A）に移行するのに必要最小限の電圧を印加すればよいことになり、 $q$  軸への負の電圧印加によるトルク変動を必要最小限に抑えることができる。

【0103】（4）第 2 実施例における低速時モータ制御処理

次に本発明の第 2 の実施例について説明する。第 2 実施例の電気角検出装置およびモータ制御装置 10 は、ハードウェアの構成としては、第 1 実施例と同様である。また、低速時制御ルーチンの流れも第 1 実施例と同様である（図 5 参照）。第 2 実施例では、高トルク時の電気角検出処理（図 5 のステップ S 400）が、第 1 実施例と相違する。

【0104】本実施例における高トルク時の電気角検出処理ルーチンについて図 17 に示すフローチャートを用いて説明する。高トルク時の電気角検出処理ルーチンが開始されると、CPU 120 は電流初期値  $I_{\delta 0}$  を検出する（ステップ S 455）。後述する通り、本実施例では、 $q$  軸に相当する  $\delta$  軸方向の電流のみを用いて電気角検出を行うため、 $\gamma$  軸方向の電流初期値は検出する必要がない。

【0105】 $\delta$  軸方向の電流の検出は、第 1 実施例と同様である。即ち、CPU 120 は、U、V、W 各相の電流を検出する電流センサ 102、103、104 により出力された信号を、フィルタ 106、107、108 および ADC 112、113、114 を介して入力ポート 116 から入力し、先に「（2）モータの電流制御」において説明した演算に基づいて、U、V、W 相から  $\gamma$  軸、 $\delta$  軸方向への変換を行うことにより、これらの電流値を検出する。 $d$  軸、 $q$  軸は図 4 に示した通り、モータ 40 の電気角が定まらなと定義できないため、CPU 120 は想定された電気角  $\theta_c$  に基づいて  $\gamma$  軸、 $\delta$  軸を想定し、その電流値を検出している。従って、想定している電気角  $\theta_c$  と現実の電気角  $\theta$  との間には、図 4 に示すように誤差角  $\Delta\theta$  が存在する。

【0106】次に、CPU 120 は想定された電気角  $\theta_c$  に基づいて決定される  $\delta$  軸方向に検出用の電圧  $\Delta V_\delta$  を印加する（ステップ S 460）。これは、初期状態の



電圧に $\Delta V \delta$ なる正の電圧を重畳して印加するものであり、初期状態の電圧を $\Delta V \delta$ だけ増して印加することと同義である。第1実施例では $\delta$ 軸に負の電圧を重畳して印加していたのに対し、本実施例では正の電圧を印加する点で相違する。もっとも、後述する通り、本実施例では負の電圧を印加するものとしても実現することができる。

【0107】CPU120はサンプリングタイム $t_s$ の経過を待って（ステップS465）、 $\delta$ 軸方向の電流値 $I \delta 1$ を検出し（ステップS470）、先に検出していた初期電流 $I \delta 0$ からの差分である電流変化量 $\Delta I \delta$ を算出する（ステップS475）。なお、第1実施例では、いわゆるデッドタイムロスにより生じる電流変化量の誤差を回避するための処理を行っているが（例えば、図9のステップS425～S440）、本実施例では後述する通り、かかる誤差も含めたテーブルを使用して電角を検出するため、デッドタイムロスを回避するための処理を行う必要はない。もっとも、電角の検出にデッドタイムロスの影響を含まないテーブルを用いる場合には第1実施例で説明したと同様の補正を施す必要がある。

【0108】次に、CPU120はトルク指令値に応じた電角を算出するための係数 $k_1$ 、 $k_2$ を求める（ステップS480）。これらの係数は、電角の誤差角と上記電流変化量 $\Delta I \delta$ との間の関係を直線近似する際の傾きおよび切片を表す係数であり、トルク指令値に対応して予めテーブル形式で記憶されている。上記ステップでは、該テーブルから相当する値を読み込み、必要に応じて補間演算することにより係数 $k_1$ 、 $k_2$ を求めるのである。

【0109】上記係数について、図18を用いて説明する。図18は、電角の誤差角と上記電流変化量 $\Delta I \delta$ との関係をトルク指令値をパラメータとして示したものである。 $i_1$ 、 $i_2 \cdots$ なるパラメータがトルク指令値を示しており、この順にトルク指令値が大きくなっていることを意味している。図18に示す関係が存在する理由については、既に説明した。かかる関係は、モータ40および検出用に印加される電圧値および時間に応じて変化するものであり、実験的に求めることができる。図18は印加された電圧に対して、デッドタイムロスによる誤差も含めて検出される電流を示したものである。

【0110】図18の電流変化量 $\Delta I \delta$ にトルク指令値に応じた有意差が現れている範囲（ $i_3 \sim i_6$ ）が高トルク時に相当する。従って、本実施例で高トルク時の電角検出処理を行うか否かの判断に用いる閾値 $T_1$ は（図5のステップS200参照）、図18の値 $i_2$ と $i_3$ の間の値ということになる。この閾値は必ずしも第1実施例における閾値 $T_1$ とは一致しない。

【0111】図18に示した通り、電流変化量は、誤差角 $-20^\circ \sim 40^\circ$ 程度の範囲で概ね直線で近似でき

る。上述の係数 $k_1$ 、 $k_2$ は、この近似直線の傾きおよびいわゆるY切片である。なお、誤差角が上記範囲を超える場合には、図18から明らかな通り直線近似することはできないが、本実施例では、モータ40の回転速度に応じて誤差角がこの範囲を外れない程度の細かい周期で電角を検出しているため、直線近似で十分な精度を保証することができる。

【0112】こうして決定された係数 $k_1$ 、 $k_2$ に基づいてCPU120は、誤差角 $\Delta \theta$ を算出し（ステップS485）、想定した電角 $\theta_c$ を補正する（ステップS490）。本実施例では、図18を上記係数 $k_1$ 、 $k_2$ および電流変化量 $\Delta I \delta$ を用いて、 $\Delta \theta = k_1 \cdot \Delta I \delta + k_2$ で誤差角 $\Delta \theta$ を算出する。

【0113】以上で説明した電角検出装置およびモータ制御装置10によれば、第1実施例の場合と同様、低速運転時に高トルクが要求された場合でも電角を精度良く検出することができ、モータ40を適切に制御することができる。また、電角の検出に当たり出力トルクに影響を与える $q$ 軸方向に正の電圧を印加して電角を検出することができるため、出力トルクが要求されたトルクを下回ることがない利点もある。さらに、電流変化量の検出に当たり、デッドタイムロスによる誤差をキャンセルするための処理（例えば、図9のステップS425～S440）を行う必要がないため、第1実施例の電角検出装置に比べ処理の高速化を図ることもできる。

【0114】なお、上記実施例では処理の高速化の観点から、図18の電流を直線近似して取り扱うことを可能とするために、誤差角が $-20^\circ \sim 40^\circ$ 程度の範囲を外れないように、細かい検出周期で電角を検出するものとしているが、かかる誤差角を超える範囲でも電角を検出可能とするために、図18のグラフをいくつかの区分に分割して、直線近似を適用するものとしてもよい。また、電角の検出精度を高めるためにこれらを曲線で近似するものとしたり、テーブル形式でデータを記憶したりするものとしてもよい。

【0115】もっとも、図18から明らかな通り、誤差角が概ね $-90^\circ \sim 30^\circ$ の範囲では、誤差角に応じた電流の変化量がわずかであるため、十分な検出精度を確保することが困難である。従って、停止しているモータ40に対し制御を開始する場合等、電角の誤差が非常に大きくなることが想定される場合には、他の電角検出方法を併用し、予め誤差角の範囲を絞り込んでから本実施例の方法を適用することが望まれる。併用すべき電角検出方法としては、例えば本出願人が出願した特開平7-177788に記載された技術等が挙げられる。

【0116】上記実施例では誤差角と電流変化量との関係を予め記憶しておくものとしているが、かかる関係に代えて検出用の電圧印加の開始から電流変化量がある所定値に至るまでに要する時間と誤差角との関係を記憶す

るものとしてもよい。こうすれば、電流値がモータ 4 0 の定格を大きく超えることを防止することができる。

【0 1 1 7】また、上記実施例では、電気角の検出用に正の電圧を印加しているが、上記方法は負の電圧を印加するものとしても適用できる。従って、例えば、トルク指令値に応じて印加される電圧にさらに検出用の正の電圧を印加することにより、モータ 4 0 の定格電流を大きく超える電流が流れるおそれがあるような場合には、負の電圧を印加するものとしてもよい。かかる場合には図 1 8 に相当する関係を予め負の印加電圧に対して実験的に設定しておく必要がある。

【0 1 1 8】以上、本発明の種々の実施例について説明してきたが、本発明はこれらに限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲で、種々の形態による実施が可能である。

【図面の簡単な説明】

【図 1】モータ制御装置 1 0 の概略構成を示すブロック図である。

【図 2】三相同期モータ 4 0 の概略構成を示す説明図である。

【図 3】三相同期モータ 4 0 の固定子 3 0 と回転子 5 0 との関係を示す端面図である。

【図 4】三相同期モータ 4 0 の等価回路図である。

【図 5】低速時制御ルーチンの処理内容を示すフローチャートである。

【図 6】低トルク時電気角検出処理ルーチンの処理内容を示すフローチャートである。

【図 7】低トルク時電気角検出処理ルーチンにおける印加電圧と検出電流の様子を示すグラフである。

【図 8】低トルク時電気角検出処理ルーチンにおいて検出された電流と誤差角の関係を示すグラフである。

【図 9】高トルク時電気角検出処理ルーチンの処理内容を示すフローチャートである。

【図 1 0】高トルク時電気角検出処理ルーチンにおける印加電圧と検出電流の様子を示すグラフである。

【図 1 1】高トルク時電気角検出処理ルーチンにおいて検出された電流と誤差角の関係を示すグラフである。

【図 1 2】モータ 4 0 の磁気飽和特性を示すグラフである。

【図 1 3】モータ電流制御処理のタイミングを説明する

説明図である。

【図 1 4】トルク指令値と印加電圧  $\Delta V \delta$  との第 1 の関係を示すグラフである。

【図 1 5】トルク指令値と印加電圧  $\Delta V \delta$  との第 2 の関係を示すグラフである。

【図 1 6】トルク指令値と印加電圧  $\Delta V \delta$  との第 3 の関係を示すグラフである。

【図 1 7】第 2 実施例における高トルク時の電気角検出処理の流れを示すフローチャートである。

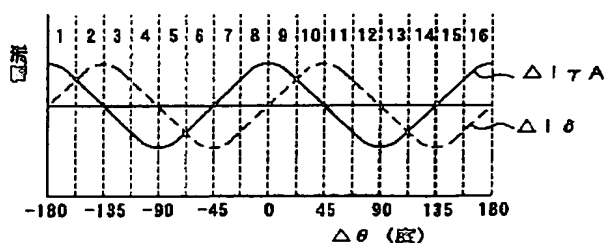
【図 1 8】誤差角と電流変化量との関係を示すグラフである。

【図 1 9】高トルク時における誤差角と磁界との関係を示す説明図である。

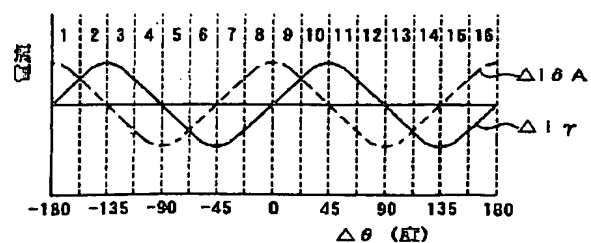
【符号の説明】

- 1 0 …モータ制御装置
- 2 0 …板状固定子
- 2 2 …ティース
- 2 4 …スロット
- 3 0 …固定子
- 3 2 …コイル
- 3 4 …ボルト
- 4 0 …三相同期モータ
- 5 0 …回転子
- 5 1, 5 2, 5 3, 5 4 …永久磁石
- 5 5 …回転軸
- 5 7 …板状回転子
- 6 0 …ケース
- 6 1, 6 2 …軸受
- 7 1, 7 2, 7 3, 7 4 …突極
- 1 0 0 …制御用 ECU
- 1 0 2, 1 0 3, 1 0 4 …電流センサ
- 1 0 6, 1 0 7, 1 0 8 …フィルタ
- 1 1 2, 1 1 3, 1 1 4 …A/D
- 1 1 6 …入力ポート
- 1 1 8 …出力ポート
- 1 2 0 …CPU
- 1 2 2 …ROM
- 1 2 4 …RAM
- 1 2 6 …クロック
- 1 3 0 …電圧印加部

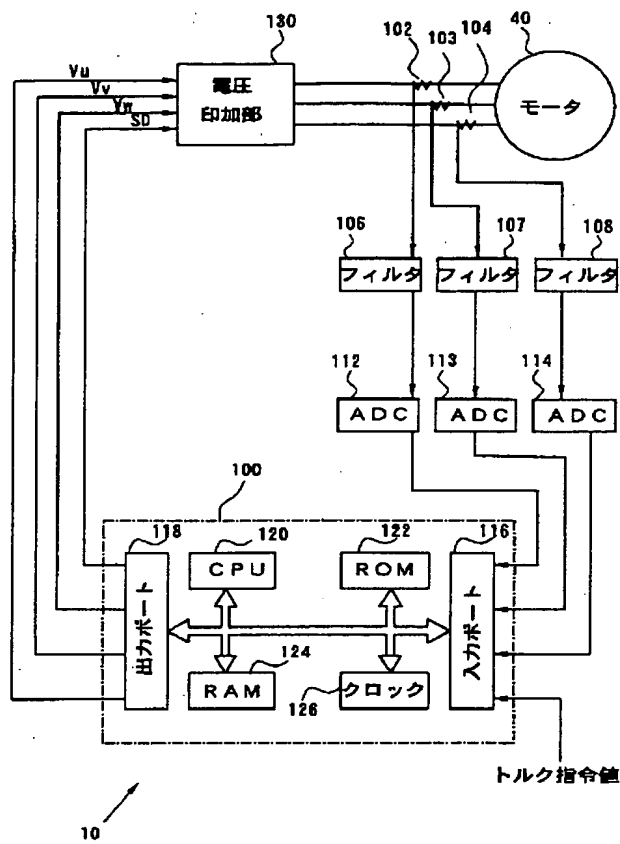
【図 8】



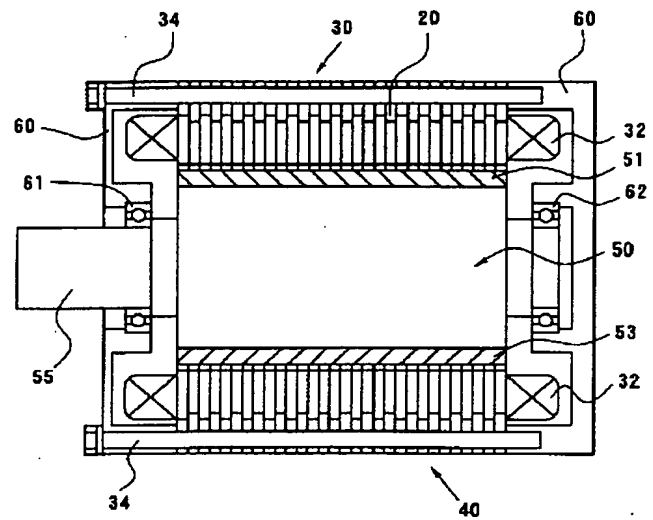
【図 1 1】



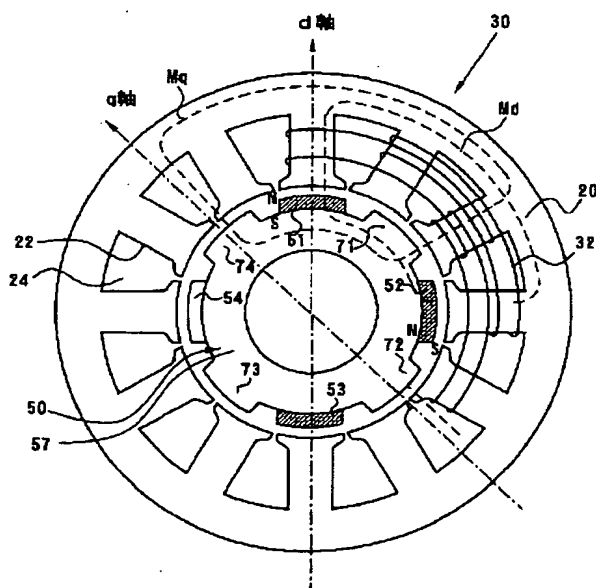
【図1】



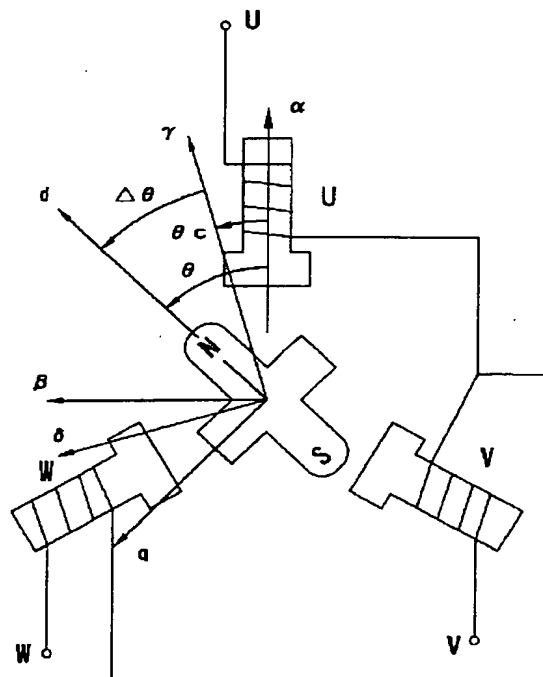
【図2】



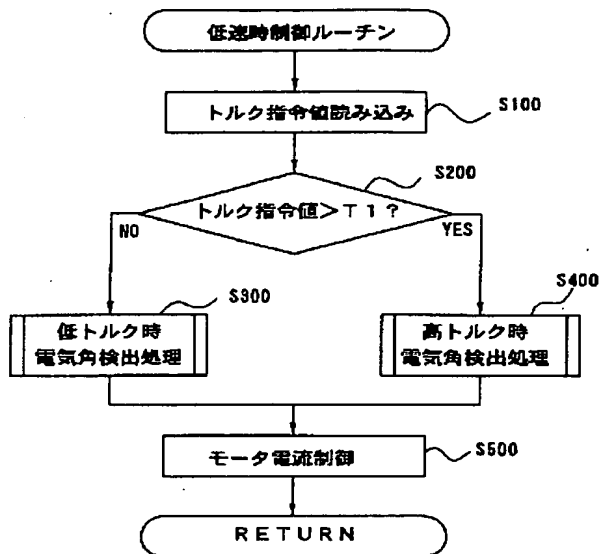
【図3】



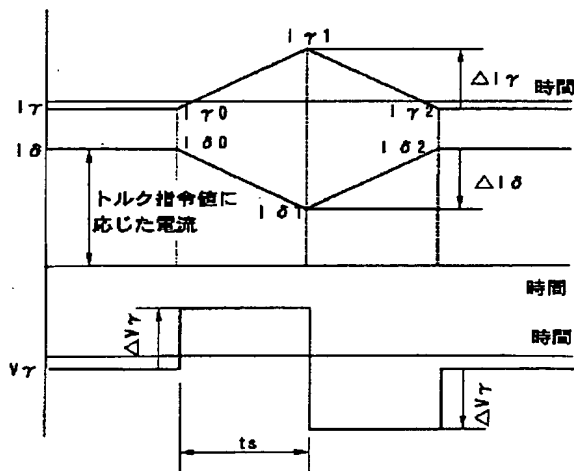
【図4】



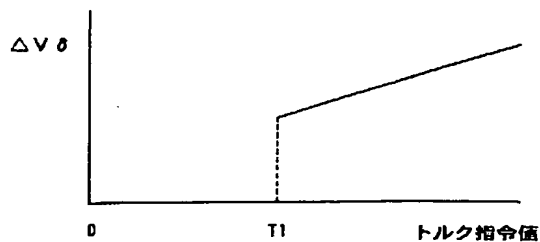
【図5】



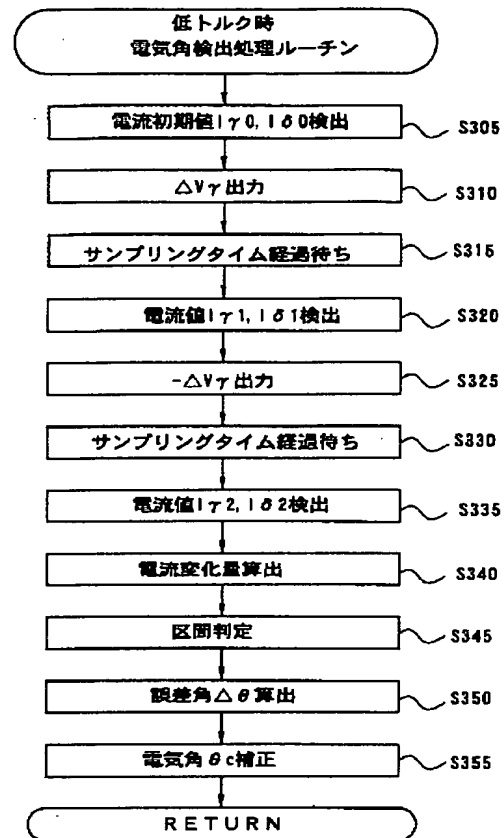
【図7】



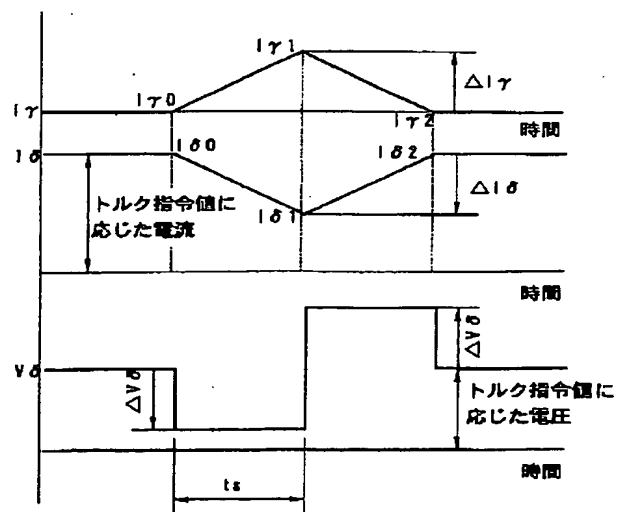
【図14】



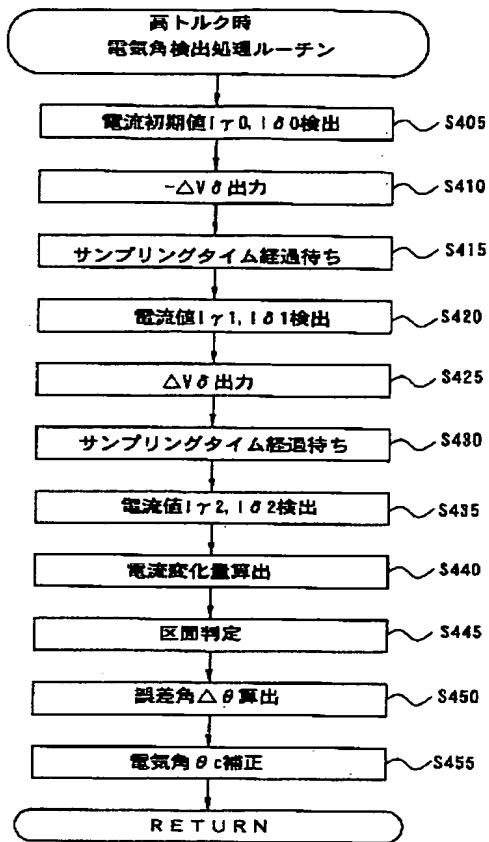
【図6】



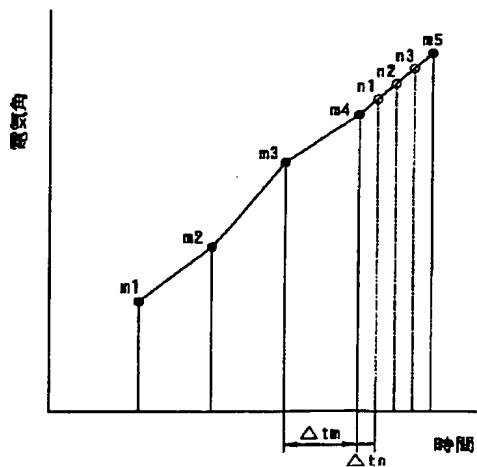
【図10】



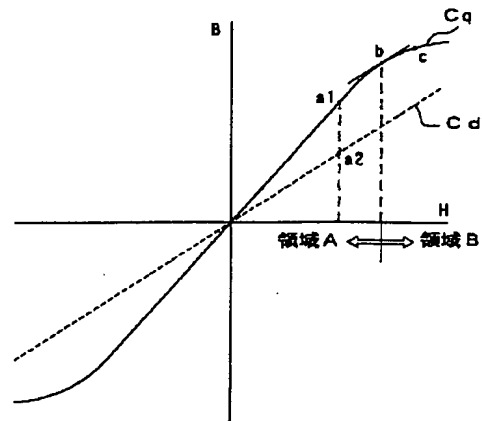
【図 9】



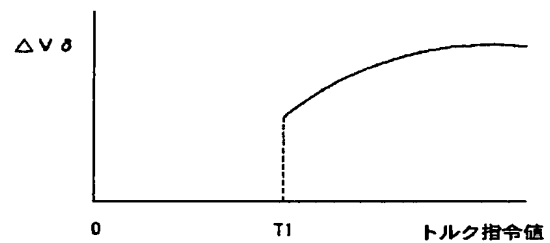
【図 13】



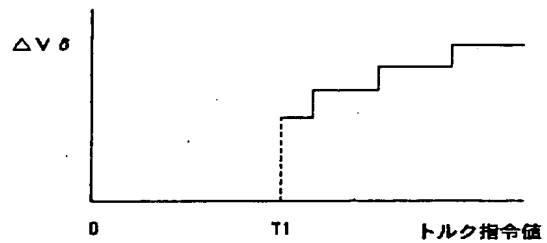
【図 12】



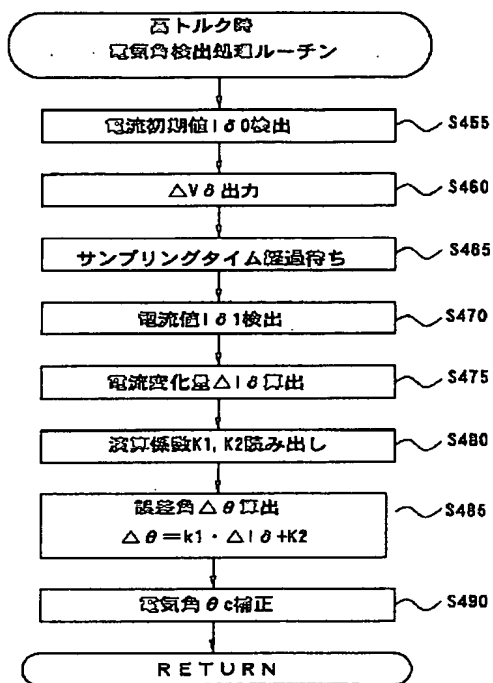
【図 15】



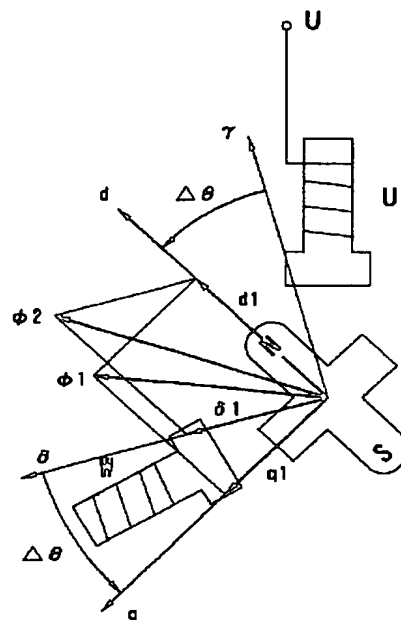
【図 16】



【図 17】



【図 19】



【図 18】

